



TITLE:

地盤材料におけるAEのカイザー効果特性に関する実験的研究(
Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

道廣, 一利

CITATION:

道廣, 一利. 地盤材料におけるAEのカイザー効果特性に関する実験的研究. 京都大学, 1987, 工学博士

ISSUE DATE:

1987-05-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r6249>

RIGHT:

地盤材料におけるAEのカイザー
効果特性に関する実験的研究

昭和61年10月

道 廣 一 利

地盤材料におけるA Eのカイザー 効果特性に関する実験的研究

昭和61年10月

道 廣 一 利

序 論

Acoustic Emission（以下AEと記す）は、変形に伴う固体内の弾性エネルギーの変化を検出するものであり、材料内の動的構造変化を知る上で貴重な情報を提供しているといえる。AE技法は、ここ最近30年間に大きな発展をとげているが、対称とする材料も金属から複合材料、セラミックス、コンクリートおよび地盤材料等と多岐にわたっている。このように多種の材料に応用されだしたのはAE計測器の進歩にほかならない。しかしながら、ただ単にAEを計測するだけでなく、信号処理の技術向上に伴い、計測目的に適した信号処理をおこなわなければならない。

本論文は地盤材料にAEを適用し、岩石、粘性土および粒状土におけるAEのカイザー効果特性を明らかにするとともに、岩盤の有する地圧や粘性土の先行圧縮応力を求め、また粒状土においては粒子の変形・挙動をAEを介して明らかにしたものである。

1. 岩石

岩盤の地山内における地圧を求めるために、古くから色々な方法がおこなわれてきた。例えば岩盤表面にひずみ計を設置し、その周辺にスリットをいれ応力を解放し、ひずみの変化量から応力を求める方法等あった。しかしながら、これらの方法はごく限られた条件での測定という欠点があった。最近、ボア－ホールを穿孔して地山における地圧を測定する方法が開発され、トンネルや地下発電所等建設のための掘削における岩盤力学における問題点の一つである地圧測定に大いに役立っている。大別すれば、応力解放法および Hydraulic Fracturing法がある。しかしながら、これらの方法では、設備が大掛かりになり、多大な費用がかかり、かつ測定が長期にわたるという欠点と測定データに相当なバラツキがあるといわれている。

本研究では、AE法を利用して地圧を求める上で必要不可欠な岩におけるカイザー効果特性を明らかにしたものである。

2. 粘性土

地盤沈下量を的確に推定するためには、粘性土の先行圧縮応力を知る必要がある。一般には圧密試験に基づいてCasagrande法が用いられている。しかし、この方法にはいくつかの問題点があり、一意的な決定法ではないと指摘されている。

本研究では、粘性土におけるカイザー効果現象を確認した上で、この現象を利用し、洪

積粘土に適用して、その有効性を明らかにした。

3. 粒状土

地盤や土構造物の沈下・変形に関する問題の解明には、土の応力－変位関係を明らかにすることが必要である。そこで粒子挙動の観測手段の一つとして、砂粒子の移動によって発生するAEを利用することにより、応力－変位関係とAE発生状況を比較し、その対応性を明らかにした。

目次

序 論	(1)
第 1 章 序論	1
第 1 節 地盤材料のAEに関する既往の研究	3
1-1 岩石に関する研究	3
1-2 土に関する研究	6
第 2 節 本論文の内容と構成および意義	7
参考文献	9
第 2 章 AE測定装置と測定条件	14
第 1 節 岩石	14
第 2 節 粘性土	17
第 3 節 粒状土	18
参考文献	20
第 3 章 載荷方法が花崗岩のカイザー効果に及ぼす影響	21
第 1 節 序論	21
第 2 節 実験試料および実験装置	21
第 3 節 実験とその結果の考察	22
3-1 一方向の繰返し試験	23
3-2 大きさの異なる二方向の繰返し試験	24
3-3 大きさの異なる三方向の繰返し試験	27
3-4 三軸圧縮による繰返し試験	29
第 4 節 結論	33
参考文献	34
第 4 章 花崗岩のクリープひずみとカイザー効果の関係	35
第 1 節 序論	35

第2節	試料、実験装置および実験方法	35
第3節	結果と考察	37
3-1	ひずみ飽和状態におけるカイザー効果	37
3-2	応力解放時間とカイザー効果の関係	38
3-3	階段荷重とカイザー効果の関係	41
第4節	試料解放期間とカイザー効果より求めた見掛けの 先行軸応力の関係	42
第5節	結論	43
	参考文献	45
第5章	種々な岩石におけるカイザー効果特性	46
第1節	序論	46
第2節	試料、実験装置および実験方法	47
第3節	実験結果と考察	48
3-1	一軸繰り返し試験	48
3-2	クリープ試験	52
3-3	階段荷重によるクリープ試験	55
第4節	結論	56
	参考文献	58
第6章	応力の解放時間とカイザー効果の関係	59
第1節	序論	59
第2節	試料と実験方法	59
第3節	試料採取後の解放期間とカイザー効果の関係	60
第4節	A E法と他の方法との比較	64
第5節	結論	67
	参考文献	69
第7章	A Eによる粘性土の先行圧縮応力の推定	70
第1節	序論	70

第2節	実験	71
2-1	試料および実験装置	71
2-2	実験方法	72
第3節	実験結果と考察	72
3-1	粘性土におけるカイザー効果の確認	72
3-2	洪積粘土における $P_C \cdot AE$ の推定	73
第4節	結論	78
	参考文献	80
第8章	粒状体の粒子挙動とAEの関係	81
第1節	序論	81
第2節	試料、実験装置および実験方法	81
第3節	砂の各状態の定義	83
第4節	実験結果と考察	85
4-1	砂のせん断中におけるAE特性	85
a)	繰返しせん断時の応力-変位関係	85
b)	弾性状態以後の応力-変位関係	86
c)	砂におけるカイザー効果	87
d)	応力-変位曲線とAEの相関性	88
e)	載荷方向の異方性がカイザー効果に及ぼす影響	89
第5節	結論	92
	参考文献	94
第9章	結論	95
謝辞		99
付録 (参考資料)		101

第 1 章 序 論

AEとは Acoustic Emission の略で、その名の通り“音の放出”のことであるが、一般には耳では聞けない場合が多い。AEに対する関心が特に高まった理由としては、材料の変形や破壊の現象は非定常的なものであり、これを観測する手段としては、マクロ的にはひずみ計、ミクロ的には電子顕微鏡等が挙げられるが必ずしも材料内における現象を正確に反映しているとは言い難い。また、最近特に社会的に重要な構造物（例えば、原子力発電所等）に対する安全監視の要求が強まっており、多くの研究者がその監視手段として、従来より行われている方法に比して、AE法は非常に有効であることを明らかにしている¹⁾²⁾。

最近国内における、土質工学分野においても、トンネルや斜面の安定管理、水力発電所ダムの健全性確認、および土質調査法等へのAE法の適用が試みられている。

一般にAEの研究を分類すると、主として次のように分類される³⁾。

- (1) 材料研究
- (2) 割れの検出
- (3) 溶接の管理
- (4) 最大応力経過の推定
- (5) 構造物の健全性診断
- (6) 地すべりの検出
- (7) 地震予知に関する研究

上記(1)～(7)の概要は次のようである。

(1) 材料研究： AE観測を行うことにより、従来得られなかった微視的過程が刻明に追跡できるようになり、従来より微視的現象を捉らえるために使用されていた電子顕微鏡等に変り、材料の変形・破壊機構の解明にAE観測が多く用いられるようになってきた。また、対象となる材料も金属をはじめ、岩石、セラミックス、木材、複合材料などと非常に多岐にわたっている。

(2) 割れの検出： 材料内に発生する、割れに伴うAE信号のエネルギーは非常に大きいという利点があるため、AEの利用において(1)の材料研究と同様に非常に実用性に富んだ研究分野である。この研究は、部分的に現象をみれば(1)の材料研究に、構造物全体としてみれば(5)の構造物の健全性診断に分類される。

(3) 溶接の管理： この研究は金属関係において最も遅れた分野である。その理由は溶接時における電氣的ノイズや機械的ノイズが原因となっている。しかしながら、最近では、これらのノイズをうまく処理することにより、電子ビーム溶接等のモニタリングに使用され始めている。

(4) 最大応力経過の推定： 一度応力を受けた材料に再載荷しても、その応力に達するまで、ほとんどAEが発生しない現象、いわゆるカイザー効果現象を利用することにより、材料が過去に受けた最大応力を推定しようとするもので、特に土木分野においては、最近岩盤の地圧や洪積粘土の先行圧縮応力の推定等に利用され始めている。

(5) 構造物の健全性： 土木におけるAEを利用した構造物の健全性診断については、主に橋梁や水力発電所ダムおよび空港の滑走路などのモニタリングに最近試験的に使用されており、AEの発生状況と欠陥部や異常応力集中部などの発生との間に良い相関性が得られている。

(6) 地すべりの検知： 地すべり予知において、従来より使用されている伸縮計や傾斜計などとAEモニターを併用することにより、より一層正確な地すべりの予知を行うことを目的に研究が進められている。

(7) 地震予知に関する研究： 岩石供試体を用い、種々な応力を試料に加えることにより発生するAEを検知し、AEの発生過程、応力集中箇所およびAEの震源分布等を明らかにすることにより、地震予知の基礎的データとして役立たせようとする研究である。

本論文における研究は、主に上記(4)で述べたAEのカイザー効果（一度応力履歴を受けた材料に再載荷しても、その応力に達するまで、ほとんどAEが発生しない現象）を利用して地盤材料（岩石、粘性土、粒状土）内の最大応力経過の推定を行ったものである。第3章から第8章で詳述するが、最大応力履歴の推定にカイザー効果現象を利用する際、この現象が金属材料などと同様な取扱いができるかといった根本的な疑問が生じる。

そこで、地盤材料におけるAEのカイザー効果特性について考察する前に地盤材料における従来の研究を紹介し、本研究の目的と意義について論じる。

第1節の1-1では、岩石におけるAEに注目し、どのような歴史をたどって発展してきたかを概観する。第1節1-2では、粘性土・粒状土にAEを適用した研究について紹介する。また、第2節では本論文の内容と構成および意義について述べる。

第1節 地盤材料のAEに関する既往の研究

1-1 岩石に関する研究

岩石・岩盤分野におけるAEの利用方法を大別すれば、実験室内でAEにより諸現象を明らかにしようとするものと、原位置において応用しようとするものの二種類に分けられる。これらの総括としては、Hardy¹⁾(1977)や小林⁴⁾(1978)らによって既に報告されているが、ここで簡単にふれてみる。

実験室内で行われてきた研究の動向について

AEを岩石・岩盤分野に取入れたのは、Obert-Duvallら⁵⁾(1945)であろう。彼らは、石灰岩、花崗岩、砂岩および片岩を供試体として用い、一軸圧縮応力を加えながらAEを観測し、破壊強度の近傍では、AEの発生数が増加し、逆に破壊後は減少することをみ出した。このことは、岩石の損傷の頻度を知る上で重要な意味をもっている。Obert-Duvallが指摘したこの傾向は、三軸圧縮応力を加えた場合にも同じ傾向を示すことを、例えばSuzuki et al.⁶⁾(1964)によっても確認されている。

Goodman⁷⁾(1963)は岩石(花崗岩、砂岩、石灰岩)を用い、載荷と除荷による繰り返しを行いながらAEを観測し、1回目の載荷時に観測されるAE数に比べ、2回目の載荷時にはAE数が少なくなることを確認した。そして、予め与えた先行荷重を越える荷重が加えられると、この点を境として、AE数が増加することをみ出した。このようにGoodmanによって、岩石においてもカイザー効果が存在することが確かめられている。ここで、簡単にカイザー効果についてふれておくと、ドイツのKaiser⁸⁾(1953)は、金属材料を用いて、一度荷重をかけた後、除荷し再載荷すると、前回の荷重値を越えるまではAEが発生しないことをみ出した。この非可逆的現象がカイザー効果と呼ばれ、最大応力履歴の推定に利用されている。

一方、一軸引っ張り応力下におけるAEも観測されている。圧縮応力下では、主として損傷の頻度を知る上でAEの発生数を測定していたが、Brown-Singh⁹⁾(1966)らは引っ張り応力下の挙動をAEエネルギーで評価することを試みている。使用した試料は石灰岩、砂岩および花崗岩であり、その結果与えた引っ張り荷重が破壊に近づくときAEエネルギーが増大することを確認している。このことは先の結果と合せて考えれば、与えた荷重が圧縮、引っ張りにかかわらず材料が破壊する時には急激にAE数が増大することを意味している。

これまでに述べたように、AE法により、実験室内において岩石試料の破壊の様子を定量

的に表現しようとする試みが多くの研究者によって受け継がれている。その代表例として Mogi¹⁰⁾(1962)の研究が挙げられる。それは、花崗岩のようなぜい性岩石に偏差応力を加えると、微小割れ目の発達に伴って生ずるAEの発生数が非弾性的なひずみ量と良好な相関性のあることを指摘した。現在では、岩石の破壊現象を捉らえる上で、しばしばMogiタイプの信号として比較されている〔例えば、Boyce¹¹⁾(1981)〕。Mogiの研究はAEの発生様式から自然地震の発生機構を知るための一つの方法としており、そのため、発生するAEの振幅分布に着目している。その中で、Mogi¹²⁾(1962)は一軸圧縮応力下で発生するAEの振幅頻度分布が、石本-飯田¹³⁾(1939)の式を満足するものとして、ある一定時間に発生するAEの振幅別度数分布の勾配 m を求めたところ、不均質な岩石であればあるほど m 値が大きくなることを示した。一方、Scholz¹⁴⁾(1968)は岩石を一軸圧縮あるいは三軸圧縮することにより発生するAEの m 値というものは偏差応力の増加につれて減少することを明らかにした。しかしながら、岩石試料を用いて破壊を予知するためには、破壊が始る位置を知ることが重要であろうという観点から、Scholz¹⁵⁾(1968)は花崗岩供試体に一軸圧縮応力を加えながら、AE震源を追跡することを試みている。

以上は、岩石・岩盤分野にAEが利用され始めてからの簡単な研究動向を述べたものであるが、特にここで最近の国内での研究動向にふれてみる。すでに述べたように、AEの発生様式が自然地震の発生機構を知る一つの手法として研究され始めたのは、地震国日本としては当然のことからであろう〔例えば、Mogi¹²⁾(1962)、Suzuki-Hamaguchi¹⁶⁾(1966)〕。

一軸あるいは三軸応力下のもとで岩石供試体が破壊にいたるまでのAEの発生過程を調べてみると、不安定な破壊が進行すると急激にAEが増大し、同時に体積ひずみも弾性域からずれ始めることが指摘されている〔例えば、柳谷 他¹⁷⁾(1978)、松木 他¹⁸⁾(1978)、江原 他¹⁹⁾(1978)〕。一方、西沢ら²⁰⁾(1981)は低レベルの応力下では、供試体から発生するAEは不規則的であるが、破壊直前では破断面の近傍に集中することを確認した。また、AEの周波数成分に着目すると、低レベルの軸圧下では低周波成分が卓越し、破壊付近では高周波成分が卓越することをOhnaka et al²¹⁾(1981)が指摘している。

さらにクリープ試験時においてAEを観測したものとして、柳谷ら²²⁾(1984)は、クリープが始ると同時にAEが発生し、時間の経過とともに主なAE源が一つに集中し、そこから主破壊が進展することをみ出した。また、クリープが進行している段階の供試体に、クリープ応力を増加させてクリープを加速させると、AEの震源分布が急変することをNisizawa et al²³⁾(1984)が示した。これら、クリープ中にAEを観測した例は、AEの発生様式から自

然地震の発生機構を解明する手掛りとして行われている一連の研究といえよう。

つぎに、AEの発振機構を解明する目的で、楠瀬ら²⁴⁾(1981)はAEの放射特性に注目して発生様式を求め、張力型クラックのみではなく、せん断型クラックも発生原因になっていることを示した。

また、岩盤内に構造物等を建設する際には、周辺地山における岩盤の初期応力をかなり精度よく知る必要がある。従来はオーバーコアリング法のような応力解放法やフラットジャッキ法のような応力再現法が用いられているが、これらの測定法は経費が高く、かつ長時間を要するため、AE法を用いて岩盤の初期応力を求める研究が行われるようになってきた。金川ら²⁵⁾(1977)は、室内において岩石コアの一軸圧縮試験におけるAE計数の急増する応力レベル(カイザー効果)を採用して、応力解放法との比較を試みている。しかしながら、AE法を用いる場合、先に述べたようにカイザー効果が岩石においてどのようなパラメタによって支配されているのかを明確にしなければならない。そこで著者ら²⁶⁾²⁷⁾²⁸⁾は岩盤の初期応力を求める目的で岩石におけるカイザー効果特性について詳しく論じている。

以上のように、実験室内でのAEの研究動向を述べてきたわけであるが、集約すると岩盤内構造物の安全性、岩石におけるAEの発生機構(自然地震を含めて)および岩盤における初期応力の推定等の研究が行われているものといえよう。

AEを用いた原位置でのモニタリングについて

1940年前後において、Obert-Duvallら²⁹⁾(1942)は、鉱山において切羽の安定性を研究するために、AE観測を導入した。その結果、応力集中を伴ってくるとAEの発生数が急激に増加することをつきとめた。AE法によって原位置モニタリングしたObert-Duvallの研究が、岩盤分野での草分けとなっている。鉱山へのAE法の応用は、1940年以降ヨーロッパ・アメリカからアジアへと受け継がれた[例えば、Antsyferov³⁰⁾(1966)]。また、トンネル分野においてはCrandell³¹⁾(1955)や Beard³²⁾(1962)などがトンネルの安定性をAE法を用いて評価している。また、Hardy³³⁾(1981)は三次元応力を受けたガス貯留岩盤のFracturingの監視用にAE計測システムを開発し、実用化に成功している。

1960年代になると、構造物の安定性を評価するための手法として、AEでモニタリングするだけでなく、損傷箇所の位置を把握する試みがCook³⁴⁾(1963)などによってなされている。最近ではAEによるモニタリングは、鉱山やトンネルといった地下構造物の安定性を予

知するためにだけでなく、後述するが、斜面の安定性をモニタリングするためにも使われている。

1-2 土に関する研究

岩盤を対象としたAEの研究は従来より数多くなされているが、最近粘性土や粒状土についての研究が若干見受けられる。AE法を利用した土に関する研究を大別すれば、土の変形挙動とAE特性を対応づけようとするものと、斜面の安定や土質調査法等への応用をめざしたものの二つに分けられる。

前者のものとして、伯野ら³⁵⁾(1969)は砂粒子の骨格構造のミクロな破壊機構を調べるため、CBR貫入試験により、粒子移動に伴う微震音と砂粒子の粒径、含水比および密度との関係を調べている。また、Koerner et al³⁶⁾³⁷⁾³⁸⁾(1976,1977,1981)は砂質土および粘性土に対する一軸および三軸圧縮試験により、AE発生数とひずみの間には密接な関係があることを指摘した。谷本ら³⁹⁾(1982)は三軸試験により、土のAE特性と変形・破壊特性についてふれ、Saito-Uesawaら⁴⁰⁾(1961)が求めた斜面の破壊時間の推定式と同様な結論を導いている。さらに、谷本ら⁴¹⁾⁴²⁾(1983,1984)は、種々の応力条件における三軸圧縮、伸張せん断試験と二次元土槽実験においてAE特性と変形挙動特性の関係および砂における弾性域とAE特性の相関性について詳しく論じている。一方、著者ら⁴³⁾は、せん断中における砂の変形挙動をAEを介して観測し、砂の構成式との対応づけをおこなっており、粒子挙動とAE発生とは非常に密接な関係にあることを述べている。

また、Koerner et al⁴⁴⁾⁴⁵⁾および著者ら⁴⁶⁾は粘性土における先行圧縮応力の推定にAEを利用し、圧密試験による結果との比較を行い、良好な対応関係があるとしており、先行圧縮応力を求める有効な手段の一つとしている。

次に、後者のものとしては、1960年初期にBeard³²⁾によって斜面安定の監視に利用されたのが最初のものであり、Goodman-Blakeら⁴⁷⁾(1967)〔他にCadman-Goodman⁴⁸⁾(1967)やMcCaully⁴⁹⁾(1965)〕は、地すべり地帯や切り土斜面でAEの発生状況を観察し、斜面の安定性とAEの特性との相関性について論じている。さらに、新妻ら⁵⁰⁾(1983)は地すべり区域においてAE計測を実施し、AE発生数から安定ブロックと不安定ブロックに区分し、1年後には不安定ブロックにおいて地すべりが発生したことを報告しており、地すべりの予知手段として十分利用できることを示唆している。

また、谷本 他⁵¹⁾(1985)はAE計測を併用したプレッシャーメータ試験機を開発し、地盤の原位置応力の測定において有効な方法であると報告している。さらに、最近では、

Hydraulic-fracture が発生する圧力を推定する試みがなされている [例えば、Huck-Koerner⁵²⁾(1981)、谷本 他⁵³⁾(1985)、上田 他⁵⁴⁾(1984)]。

第2節 本論文の内容と構成および意義

本論文は、AE法を地盤材料に適用し、岩盤における初期応力推定のためのカイザー効果特性、粘性土のカイザー効果を利用した先行圧縮応力の推定およびせん断中における砂粒子挙動の観察などを実験的に行ったものである。各章における内容は以下に示す通りである。

第2章では、主に三種類の地盤材料におけるAE測定装置および測定条件について述べている。

第3章では、円柱供試体に繰り返し一軸および三軸圧縮試験を行い、残留ひずみの増加がほぼ認められなくなった状態（繰り返しによるひずみ飽和状態と定義する）と残留ひずみの増加がなお進行中の状態（ひずみ不飽和状態）の二つの状態の供試体についてAEのカイザー効果にどのような差異が生ずるかを明らかにした。また、花崗岩の立方供試体を用い、立方供試体の各面（X面、Y面、Z面）に大きさの異なる3方向の繰り返し軸応力を順次与え、ひずみ飽和状態とひずみ不飽和状態の供試体を作り、各方向に与えた先行軸応力が他方向にどのような影響をもたらすかを明らかにした。さらに、疑似地山状態を想定し、立方供試体に対して大きさの異なる3方向の繰り返し軸応力を与え、各軸方向ともひずみ飽和状態とした立方供試体の中央部から1方向を軸とする円柱供試体を切り出し、その円柱供試体の先行軸応力をカイザー効果より求め、得られた値が何に起因しているかを明らかにした。

第4章では、花崗岩供試体に一定のクリープ荷重を一軸圧縮試験機により加えて、クリープによるひずみ飽和状態を作成し、クリープ荷重除荷後、その供試体に一軸載荷試験を行い、AEのカイザー効果より得られた値が何に起因しているかを明らかにした。また、上述したひずみ飽和状態の試料を用い、クリープ荷重除荷後、種々の長さの期間放置し、放置することに起因するひずみの回復がカイザー効果に及ぼす影響を明らかにした。さらに、供試体に載荷するクリープ荷重の大きさを変化させ、変化後の荷重の下でひずみ飽和させた場合のカイザー効果より得られる応力が何に起因した値であるかを明らかにした。

第5章では、第3章および第4章の花崗岩で明らかにされた諸結果が他の岩種（砂岩、結晶片岩、泥岩、凝灰岩および大理石）においてどのような傾向を示すかを調べた。その

結果、大理石を除く他の岩種では、花崗岩とほぼ同一傾向を示すことが明らかになった。

第6章では、地山から採取された岩石コアが応力の解放に伴い、ひずみが回復することにより、AEのカイザー効果にどのような影響をもたらすかを調べた。その結果、AE法を用いて岩石の地圧を推定しようとする場合、試料採取後なるべく早く試験をしないと、本来岩石が有している地圧よりも小さな値が計測されることが明らかになった。

第7章では、市販粉末粘土および乱さない洪積粘土を用いて、排水等方三軸圧縮試験中に発生するAEを観測することにより、粘性土におけるカイザー効果の確認および洪積粘土の先行圧縮応力を推定し、圧密試験により求めた先行圧縮応力との比較を行った。

第8章では、粒状土の微視的観測手段としてAE法を用い、村山⁵⁵⁾⁵⁸⁾(1977)によって提案された砂の構成式の誘導過程と対比させた。本章では、主に砂を一面せん断したときの応力・ひずみ関係を観測すると同時にAEを検出し、両者の間に良好な相関関係が存在することを明らかにした。また、砂におけるカイザー効果の特性ならびに載荷方向の異方性がカイザー効果に及ぼす影響などを明らかにした。

最後に、第9章では各章の研究成果を要約し結論としている。

参考文献

- 1) Hardy,H.R.Jr. : Emergence of Acoustic Emission/Microseismic Activity as a Tool in Geomechanics, Proceedings First Conference on Acoustic Emission/Microseismic in Geologic Structures and Materials, pp.13-31, 1977.
- 2) Hardy,H.R.Jr. : Stability Monitoring of an Underground Gas Storage Reservoir, Proceedings Second Conference on Acoustic Emission / Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, pp.331-358, 1980.
- 3) 尾上守夫 他5名 : アコースティック・エミッションの基礎と応用、コロナ社、1976
- 4) 小林昭一 : アコースティック・エミッションの岩の力学への応用、材料、Vol.27, pp.118-128, 1978.
- 5) Obert,L. and Duvall W.I. : Microseismic Method of Predicting Rock Failure in Underground Mining, Parts2. Laboratory Experiments, U.S.Bureau of Mines, RI3803, 1945.
- 6) Suzuki, T.,et al. : A New Approach to the Prediction of Failure by Rock Noise,Fourth International Conference on Strata Control and Rock Mechanics、1964.
- 7) Goodman,R.E. : Subaudible Noise during Compression of Rocks, Geol.Soc.Amer. Bul.,Vol.74,pp.487-490.1963.
- 8) Kaiser,J. : Untersuchungen uber das Auftreten Gerauschen beim Zugversuch, Arkiv fur das Eisenhuttengen ,Vol.24,pp.43-45, 1953.
- 9) Brown,J.W. and Singh,M.M. : An Investigation of Microseismic Activity in Rock Under Tension ,Trans.Soc.Minig Eng.Vol.233,pp.255-265,1966.
- 10) Mogi,K. : Study of the Elastic Shocks Caused by Materials and its Relation to Earthquake Phenomena,Bull.Earthquake Research Institute,Vol.40,PP.125-173,1962.
- 11) Boyce,G.M.,et al. : Acoustic Emission Signatures of Various Rock Types in Unconfined Compression,ASTM,No.750,pp.142-154,1981.

- 12) Mogi, K. : Magnitude-Frequency Relation for Elastic Shocks Accompanying Fractures of Various Materials and Some Related Problem in Earthquakes, Bull. Earthq. Res. Inst. Vol. 40, pp. 831-853, 1962.
- 13) Ishimoto, M. and Iida, K. : Bulletin of Earthquakes Research Institute, TDJKA Vol. 17, pp. 443-478, 1968.
- 14) Scholz, C.H. : Experimental Study of the Fracturing Process in Brittle Rock Jour. Geoph. Res., Vol. 73, pp. 1447-1454, 1968.
- 15) Scholz, C.H. : The Frequency-Magnitude Relation of Microfracturing in Rock and its Relation to Earthquake, Bull. SoC. Am., Vol. 58, pp. 399-415, 1968.
- 16) Suzuki, T. and Hamaguchi, H. : The Brittle Fracture of Tempered Glass and its Relation to the Occurrence of Earthquakes, I. Sic. Rep. Tohoku Univ. Vol. 18, pp. 16-39, 1966.
- 17) 柳谷 俊 他 : 花崗せん緑岩の一軸圧縮応力下における破壊挙動について、材料、Vol. 27, No. 293, pp. 136-141, 1978.
- 18) 松本孝二 他 : 岩石の圧縮荷重下における破壊亀裂の発生、材料、Vol. 27, No. 293, pp. 142-147, 1978.
- 19) 江原昭次 他 : 岩石の非弾性体積ひずみとAE、日本鉱業会研究業績講演会講演要旨集、pp. 9-10, 1978.
- 20) 西沢 修 他 : 一軸圧縮下で発生するAE震源の時間-空間分布、地質調査月報、Vol. 32, pp. 473-486, 1981.
- 21) Ohnaka, M. et al. : Frequency Dependence of Acoustic Emission Activity in Rocks under Incremental Uniaxial Compression, Tokyou Univ., Vol. 56, No. 1, pp. 67-89, 1981.
- 22) 柳谷 俊 他 : 岩石のクリープ時に発生するAEの震源決定について、材料、Vol. 33 No. 366, pp. 272-278, 1984.
- 23) Nisizawa, O. et al. : Hypocenter Distribution Focal Mechanism of AE Events during the Stress Stage Creep in Yugawara Andesite, Pure Appl. Geophys. Vol. 122, No. 1, pp. 36-52, 1984.
- 24) 楠瀬勤一郎 他 : 岩石の一軸圧縮試験におけるAE発震機構、地震、Vol. 34, No. 2, pp. 241-250, 1981.

- 25) 金川 忠 他：岩石における地圧成分のAcoustic Emissionによる推定の試み、土木学会論文報告集、No.258,pp.63-75,1977.
- 26) Murayama,S.,Michihiro,K.,Fujiwara,T.,Yosioka,H.and Hata,K. : The Kaiser Effect on a Granite under Various Loadings,Proceedings of the 7th International Acoustic Emission Symposium,pp.586-593,1984.
- 27) 村山朔朗、道広一利、斎藤二郎、吉岡尚也：載荷方法が花崗岩のカイザー効果に及ぼす影響、土木学会論文集、No.364,Ⅲ-4,pp.107-112,1985.
- 28) 村山朔朗、道広一利、藤原紀夫、畑 浩二：花崗岩のクリープひずみとカイザー効果の関係、土木学会論文集、No.370,Ⅲ-5,pp.41-46,1986.
- 29) Obert,L. and Duvall,W.I. : Use of Subaudible Noise for Prediction of Rock Burst,Part2,U.S.Bureau of Mines,RI3654,1942.
- 30) Antyferov,M.S. : Seismo-Acoustic Method in Mining,Consultants Bureau,New York,1966.
- 31) Crandell,F.J. : Determination of Incipient Roof Failures in Rock Tunnels by Microseismic Detection,Jour,Boston Soc.Civil Engineers,pp.39-59,1955.
- 32) Beard,F.D. : Microseismic Forecasting of Excavation Failures, Civil Engineering,Vol.32,No.5,pp.5
- 33) Hardy,H.R.Jr. : Applications of Acoustic Emission Techniques to Rock Structures ,A State-of-the-Art Review,Acoustic Emission in Geotechnical Engineering Practice,ASTM STP50,PP.4-92,1981.
- 34) Cook,N.G.W. : The Seismic Location of Rock Burst,Proceedings First Symposium on Rock Mechanics,pp.493-516,1963.
- 35) 伯野元彦 他：砂が骨格構造破壊時に出す音について、土木学会論文報告集、No.164,pp.51-58,1969.
- 36) Koerner,R.M.et al : Acoustic Emission Behavior of Granular Soils,Journal of the Geotechnical Engineering Division,ASCE,Vol.103,No.GT8,pp.837-850 1977.
- 37) Koerner,R.M.et al. : Acoustic Emission Behavior of Cohesive Soils ,Journal of the Geotechnical Engineering Division,ASCE,Vol.103,No.GT8,pp.837-850 1977.

- 38) Koerner, R.M. et al. : State-of-the-Art of Acoustic Emission Behavior and Monitoring of Soils, Proceedings of Symposium on Acoustic Emission in Geotechnical Engineering Practice, ASTM STP 750, pp.93-141, 1981.
- 39) 谷本喜一、中村潤一：三軸せん断中のAE特性に関する研究、土質工学会論文報告集 Vol.22, No.3, pp.137-144, 1982.
- 40) Saito, M. and Uesawa, H. : Failure of Soil due to Creep, Proc.5th. ICSMFE, Vol.1, No.1, pp.135-143, 1983.
- 41) 谷本喜一 他：土のAE特性と変形挙動との相関性について、土質工学会論文報告集 Vol.23, No.1, pp.135-143, 1983.
- 42) 谷本喜一 他：砂の弾性領域とAE特性との関係について、第19回土質工学研究発表回講演集、pp.303-304, 1984.
- 43) 村山朔朗、道広一利：AEからみた砂の粒子挙動、土木学会論文集、No.352, III-2, pp.119-127, 1984.
- 44) Koerner, R.M. et al. : Determination of Prestress in Granular Soils Using AE, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.110, No.GT11, pp.1573-1548, 1984.
- 45) Koerner, R.M. et al. : Determination of Pre-Stress in Granular Soils Using AE, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.111, No.6, pp.828-833, 1985.
- 46) 道広一利、柴田 徹：AEによる粘性土の先行圧縮応力の推定、京都大学防災研究所年報、No.28, B-2, pp.111-119, 1985.
- 47) Goodman, R.E. and Blake, W. : Microseismic Detection of Potential Earth Slumps and Rock Slides, University California, College of Engineering, Berkeley, California Final Report SA MR128, 1964.
- 48) Cadman, J.D. and Goodman, R.E. : Landslide-Noise, Science, Vol.15, pp.1182-1184, 1967.
- 49) McCauley, M.L. : The Use of Subaudible Rock Noise Recording to Monitor Slope Stability, Engineering Geology Bull.Assoc.Engr., Vol.2, pp.1-8, 1985.
- 50) 新妻弘明 他：AE法による地すべりの予知、AE総合コンファレンス論文集、Vol.4, pp.150-159, 1983.

- 51) Tanimoto,K.et al. : Application of Acoustic Emission in In-site Test,Proc. of 10th. Int.Conf.on Soil Mech. and Found.Enging.Vol.2,pp.573-576,1981.
- 52) Huck,P.J. and Koerner,R.M. : Acoustic Emission Monitorring of Soil and Rock Grouting,Acoustic Emission in Geotechnical Engineering Practice, ASTM,STP,750,pp.155-163,1981.
- 53) 谷本喜一 他 : 岩盤の水圧破碎に伴うAEの計測とその特性、第20回土質工学会研究発表会講演集、pp.117-118,1985.
- 54) 上田貴夫 他 : ダム基礎岩盤のグラウチングに伴うAE特性、第19会土質工学研究発表会講演集、pp.107-108,1984.
- 55) Murayama,S. : Constitutive Equations of Particulate Material in the Elastic State, Preprints of Speciality Session 9, 9th.ICSMFE,pp.167-174,1977.
- 56) Murayama,S. : Constitutive Equations of Particulate Material in the Plastic State,Preprints of Speciality Session 9, 9th.ICSMFE,pp.175-182,1977.

第2章 AE測定装置と測定条件

第1節 岩石

岩石試験に使用したAE観測装置の概略図は図-2-1に示す通りである。図において、AE検出器（NF製、共振周波数 140kHz の圧電素子）で検出された信号はプリアンプとメインアンプ（ディスクリミネータに内蔵、NF921S改良型）で増幅され、ディスクリミネータに装備されたフィルターと振幅弁別器で信号処理が行われたのち、パルス化されてカウンター（NF AE931A）で計数表示され、そのデータは、デュアルカウンターに接続されている計算機（NEC PC-9801F）で処理した。なお、フィルターはAE検出器の特性を生かすため、100kHz～200kHz のバンドパスフィルターとした。また、数居値は5種類の組合せで予備実験を行い、捉えられるAE数は異なっても、AE累積曲線の変曲点が変わらないことを確かめた上で、花崗岩供試体では、先行軸応力以下の応力で発生するAEが高レベルの数居値以下になるよう低レベル V_L を 380mV，高レベルの V_H を400mV とした。これによって包絡線検波された信号は V_H を越えたのち、その包絡線が V_L 以下になれば一つのイベント・パルスとして観測されることになる。なお、他の岩種におけるスレッシュホールドレベルは表-2-1に示した通りである。

一般にAEの計数測定には通常二種類（リングダウンとイベント計数）がある。リングダウン計数法は、予め設定した数居値を越えた波の全てパルスに変換する方法で、振幅に重みづけがなされている。

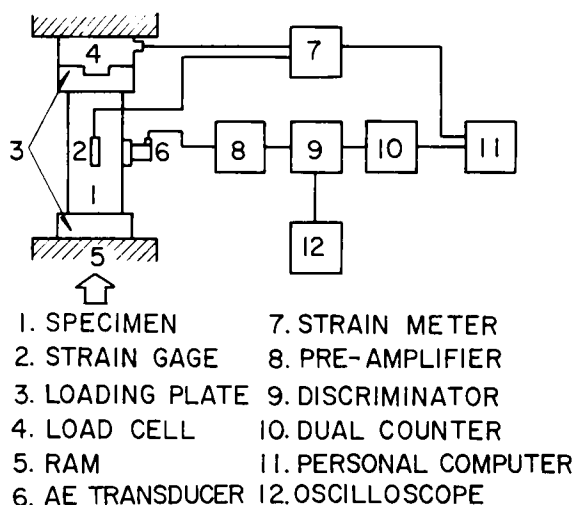


図-2-1 AE観測装置の概略図

また、イベント計数法は 1 パーストに 1 パルスが得られ、震源の位置標定あるいは震源における信号のエネルギーが大きい場合に用いられる。またイベント計数法には、原信号を包絡線検波する方法と休止時間を用いる方法とがあり、これらの計数方法を図-2-2に示す。なお、本論文における岩石実験では包絡線検波方式を用いた。

AE計測を行う上で注意しなければならない事柄の一つとしてノイズの除去がある。一般にノイズには、計測器自体から発生する電氣的なものやハムノイズ等がある。通常AE信号の雑音除去においては色々な方法が採用されているが、ここでは 3 つの雑音処理を採用した。第一は、一般的に行われているアースを施すことによりノイズ除去を行う方法。第二としては、AE変換子の共振特性とバンドパスフィルターによるAE信号の処理を行うことにより、ノイズ除去を行う方法。第三は、遠くから伝播してきたAE信号やノイズは速度分散によって、立上りが遅れることを利用し、立上りの遅い信号をノイズとして除くことにより、AE変換子近傍で発生したAEのみを計測する方法の 3 つの方法を採用した。

この他に、載荷試験機の載荷板と供試体上下端面との不整な接触によるノ

表-2-1 数居値と利得

岩石	数居値		利得
	高レベル	低レベル	
凝灰岩	250mV	230mV	90dB
砂岩	120mV	100mV	90dB
結晶片岩	200mV	180mV	100dB
泥岩	100mV	80mV	90dB
大理石	180mV	160mV	100dB

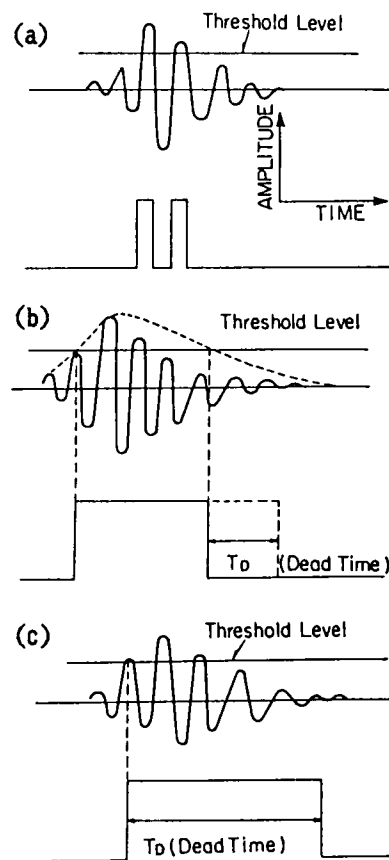


図-2-2 (a) リングダウん計数法
(b)(c) イベント計数法

イズがある。ここでは、この接触によるノイズは供試体の両端面に薄いスポンジを敷くことによって除去することができた。その検証をした例が図-2-3(a)(b)である。これらの図は、円柱供試体に 150kgf/cm^2 の軸応力を 10 回の繰り返し载荷によって与え、その後 300kgf/cm^2 まで単調载荷したときの応力とひずみおよびAE累積数の関係を示したものである。図-2-3(a)はスポンジを敷かない場合で、载荷直後より連続的なAEが発生している。一方、図-2-3(b)は供試体の上下端面にスポンジを敷いた場合で、载荷直後からある応力付近までAEの発生はみられない。スポンジを敷くことによって上下端面からのノイズを除去できるのは、いずれの供試体でも図-2-3(b)の例と同様であるが、供試体自体にマクロなクラックがある場合は供試体端面以外からも载荷直後からAEが出るので図-2-3(b)のようにはならない。そのため供試体にマクロなクラックなどの不連続部がない限り、端面の不整により、発生するノイズはスポンジを敷くことによって完全に除去できたことがわかる。

また、供試体のどのあたりからAEが多く発生しているかを調べるために、AE検出器を上部、中央部、下部に設置して観測結果を比較した。その結果、従来から報告¹⁾されているように、供試体中央部に設置した場合AE検出器の応答が最も顕著に現れた。したがって、今回の実験では、AE検出器を図-2-1で示すように、供試体中央部に置く一点観測とした。

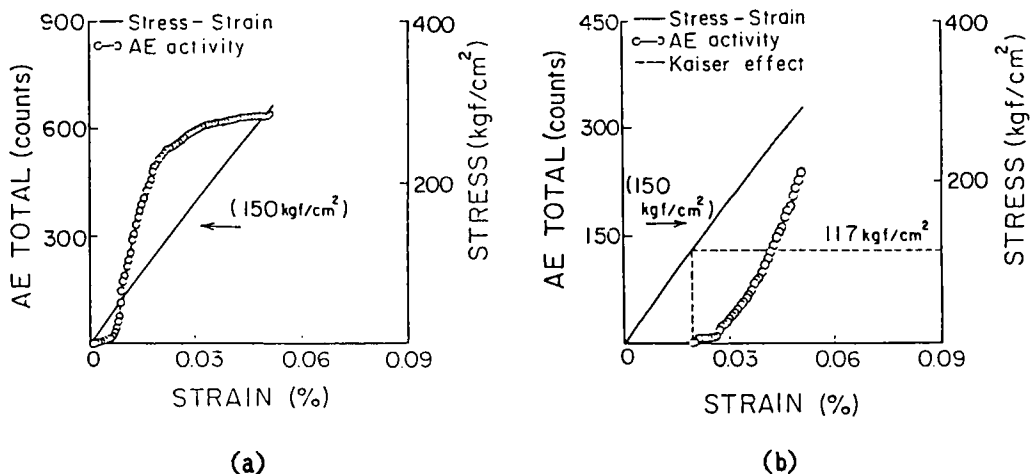


図-2-3(a)(b) (a) : 供試体上下端面にスポンジを敷かない場合
(b) : 供試体上下端面にスポンジを敷いた場合

第2節 粘性土

粘性土に使用したAE観測装置は図-2-4に示したように装置 A、B の二種類からなっている。装置 A はAEトランスデューサ、プリアンプ、ディスクリミネータ、カウンター、ウェーブメモリ、シンクロナススコープおよびペンレコーダで構成されており、供試体内部から発生する信号の波形観測を主に行った。AE検出用トランスデューサは共振周波数 80 kHz のジルコン酸鉛のものを使用した。プリアンプは、増幅とフィルターの両機能を有しており、今回の実験では H.P.F.(High Pass Filter) を 1kHz に、利得を 40dB に固定した。ディスクリミネータはフィルター、増幅および数居値設定の三機能を有しており、フィルターは H.P.F.を 1kHzにし、L.P.F.(Low Pass Filter) を 40kHz 、利得を 80dB に固定し、数居値を 60mV とした。

一方、装置 B はトランスデューサ、改良型ボルトメータおよびカウンターから成り、主にAE信号のカウント計数に使用した。改良型ボルトメータは、フィルター、増幅および数居値設定機能を有しており、今回の実験では、それぞれ B.P.F.(Band Pass Filter) を 4kHz ~ 40kHz、利得を 160dB に固定し、数居値を 60mV とした。また、AE信号の計数方法としては、図-2-2に示したリングダウン計数法を用いた。なお、主な計測器の特性は表-2-2に示す通りである。

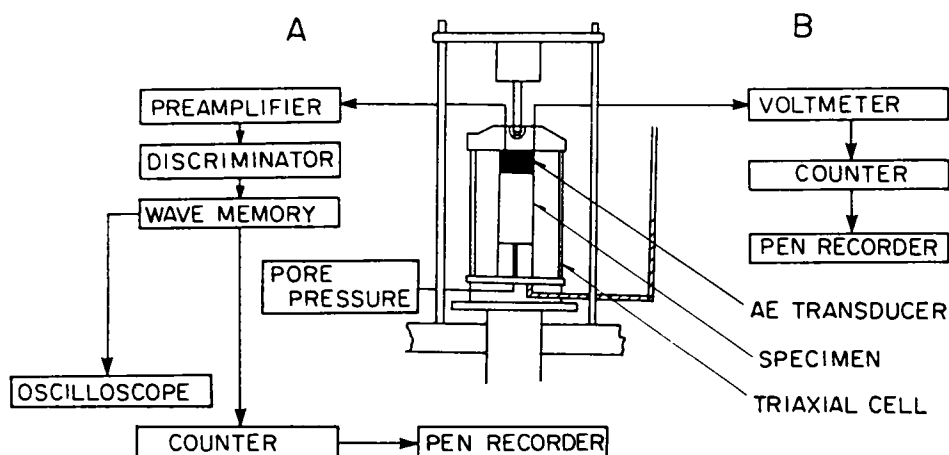


図-2-4 AE観測装置のブロックダイヤグラム(粘性土)

第3節 粒状土

表-2-2 測定器の特性

トランスデューサ	共振周波数	80kHz
プリアンプ	利得	40dB
メインアンプ	利得	80dB
フィルター	1 ~	40kHz
ボルトメータ	利得	160dB
	4 ~	40kHz

粒状土におけるAEの観測装置は、トランスデューサ、プリアンプ、ディスクリミネータ、カウンター、ウェーブメモリ、シンクロナスコープ、およびペンレコーダから構成されており、そのブロックダイアグラムは図-2-5のようである。AE検出用トランスデューサは、共振周波数 40kHz のジルコン酸鉛製の

ものを使用した。プリアンプは、フィルターと増幅の機能を有しており、今回の実験では H.P.F. を 10kHz に利

得を 40dB に固定した。ディスクリミネータは、フィルター、増幅および数居値設定機能を有しておりフィルターとしては H.P.F. を 20kHz に L.P.F. を 80kHz に、利得を 30dB に固定し、数居値はポテンションメータにより、電圧として設定し 70mV, 80mV, 120mV, 140mV および 180mV の 5段階の数居値で試験ができるようにした。カウンターの計数表示は 1sec 間における開閉時間を 0.5sec 間隔にしたので 0.5sec 間に入力されたパルス

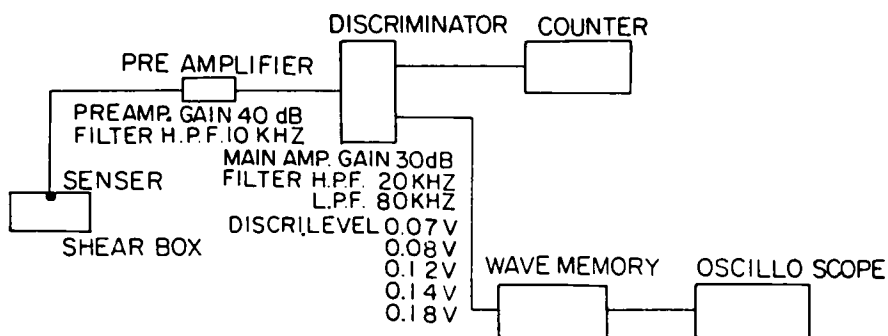


図-2-5 AE観測装置のブロックダイアグラム（粒状土）

が単位時間(1sec)当たりの個数としてデジタル方式で表されることになる。波形観測は、アンプで増幅された入力波をウェーブメモリに蓄え、それらの波を自動変換してオシロスコープに現示させるが、その現示された波の粒子軌跡をみて入力された波が実体波であるかどうかを任意抽出して調べた。

参考文献

- 1) 柳谷 俊 他：岩石のクリープ時に発生するAEの震源決定について、材料、Vol.33 No.366, pp.272-278,1981.

第3章 載荷方法が花崗岩のカイザー効果に及ぼす影響

第1節 序論

岩盤に対するアコースティック・エミッション (Acoustic Emission) は、主に鉱山における切羽の安定性を研究することから始められた。Obert¹⁾は、鉱山における山はねを予知するために、1940年代前半からAEの観測を行っていた。1953年には、Kaiser²⁾は金属材料においてAEの発生が先に加えた応力以上、すなわち先行応力以上の応力下で発生することを見出した。これがよく知られているカイザー効果である。岩石に繰り返し応力を与えた場合にも、カイザー効果が存在することはGoodman³⁾によって確認されている。また、金川⁴⁾は原位置から採取した岩石供試体に単調に増加する応力を与えて、その時のAE累積曲線の変曲点で先行応力を推定している。この先行応力は、オーバーコアリング法から求めた地圧に比して十数パーセントの誤差範囲で推定できることを述べている。

本章では岩石として花崗岩を用い、そのAEのカイザー効果に関して行った研究である。本研究の意図するところは、第1には、岩石におけるAEのカイザー効果は先行して岩石に加えられた応力値そのものに依存するよりは、むしろ先行応力によって岩石に生じたひずみのうちAE試験時に残留している残留ひずみに依存すると考えられることを実験的に検証することであり、第2には、空間に互いに直交する3方向の面のうち、ある方向の面に対するカイザー効果が、他の方向の各面に別々に加えられた先行軸応力とどのような関係にあるかを実験的に明らかにすることである。

第2節 実験試料および実験装置

実験に用いた試料は生駒産と稲田産の2種類で、生駒産は約250mの土被りを有するトンネル建設現場から採取し、稲田産は約300mの土被りを有していた切り取り地跡から大塊の岩塊として切り出した。これらの大塊の岩石をさらにのみで小割りし、それを供試体に仕上げた。供試体の形状・寸法は直径3cm、高さ6cmの円柱体と、15×15×15cmの立方体の2種類とした。生駒産の単位体積重量は2.63tonf/m³、一軸圧縮強度は610～920kgf/cm²であり、一方、稲田産の単位体積重量は2.63tonf/m³、一軸圧縮強度は820～1020kgf/cm²であった。供試体のサンプル数は生駒産、稲田産とも円柱供試体

100 個、立方供試体 20 個であった。

使用した実験装置は、供試体を繰り返し一軸圧縮と繰り返し三軸圧縮するための載荷試験機（島津製作所製）と高圧三軸圧縮試験機（マルイ製）およびAE観測装置（第2章）からなっている。

第3節 実験とその結果の考察

地山から採取した岩石試料を用いて、岩盤が地中で受けていた地圧をAEのカイザー効果を利用して求める場合、原位置の岩盤は、三次元応力状態下であり、長時間にわたり地盤応力を受けてクリープはほぼ完了し、ひずみの増加がほとんど終了している状態と思われる。岩石は載荷を受けると、ひずみはしだいに増加しついに増加が停止するが、ひずみの増加が停止した状態をここではひずみ飽和状態と定義することにする。室内において、ひずみ飽和状態を作り出す方法には長時間のクリープ載荷もあるが、それに代わる方法として、ここでは同一荷重による繰り返し載荷法を用いた。この場合、同一荷重を残留ひずみの増加が認められなくなるまで繰り返し載荷した状態を、ひずみ飽和状態とする。一方ひずみ飽和状態への繰り返し載荷途中で載荷を中止した供試体の状態をひずみ不飽和状態と称することとする。このようにして作成した兩種の試料を用いて、AEのカイザー効果から求められる先行軸応力がどのようなようになるかを比較した。実験した項目は次のようである。なお、現地より採取整形したままの各試料の先行応力を一軸圧縮試験の際のカイザー効果を利用して推定した結果、先行応力の最大値は生駒産で 82.45kgf/cm^2 、稲田産で 77.34kgf/cm^2 であった。

1) 実験Ⅰ：一方向の繰り返し試験

円柱供試体に一定軸応力の繰り返し載荷を与え、残留ひずみの増加が認められなくなった状態、すなわちひずみ飽和状態とした供試体と残留ひずみの増加がなお進行中の状態、すなわちひずみ不飽和状態の場合の 2 つの状態の供試体についてAEのカイザー効果から求めた先行軸応力を比較した。

2) 実験Ⅱ：大きさの異なる二方向の繰り返し試験

図-3-1(a)の立方供試体に大きさの異なる 2 方向の繰り返し軸応力（X 方向： 100kgf/cm^2 , Y 方向： 150kgf/cm^2 , Z 方向は繰り返し応力は無載荷）を順次与えて、ひずみ飽和状態とひずみ不飽和状態の供試体を作り、それぞれの供試体のカイザー効果から X

方向と Y 方向のそれぞれの先行軸応力を求めて比較した。

3) 実験Ⅲ：大きさの異なる三方向の繰返し試験

図-3-1(a)の立方供試体に大きさの異なる3方向の繰返し軸応力（X方向：100 kgf/cm² , Y 方向：150kgf/cm² , Z 方向：200kgf/cm²）を順次与え、各方向ともひずみ飽和状態とした供試体における各方向の先行軸応力をカイザー効果から求めて比較した。また、上述した3方向ともひずみ飽和状態とした立方供試体の中央部から図-3-1(b)に示すようにX方向を軸とする円柱供試体を切り出し（Y方向、Z方向も同様）、その円柱供試体の先行軸応力をカイザー効果から求めた。

4) 実験Ⅳ：三軸圧縮による繰返し試験

円柱供試体に一定応力比（ $\sigma_1 / \sigma_3 \rightarrow$ 鉛直軸圧 / 側圧）の三軸繰返し载荷を与え、残留ひずみの増加が認められなくなった状態、すなわちひずみ飽和状態（繰返し回数 50 回）とした供試体と残留ひずみの増加がなお進行中の状態（ひずみ不飽和状態、繰返し回数 10 回）との2つの状態の供試体について、繰返し終了後直ちに一軸圧縮試験を行い、2つの状態の供試体についてAEのカイザー効果から求めた先行軸応力を比較した。

3-1 実験Ⅰの結果と考察

供試体直径 3cm , 高さ 6cm の円柱供試体に 100kgf/cm² の繰返し軸応力を 50 回与えると残留ひずみの増加がほとんど認められなくなったので、この場合をひずみ飽和状態とした。また、ひずみ飽和状態への繰返し载荷途中のものとして繰返し回数 10 回の供試体をひずみ不飽和状態の試料とした。そのときの残留ひずみの増加と繰返し回数の関係を図-

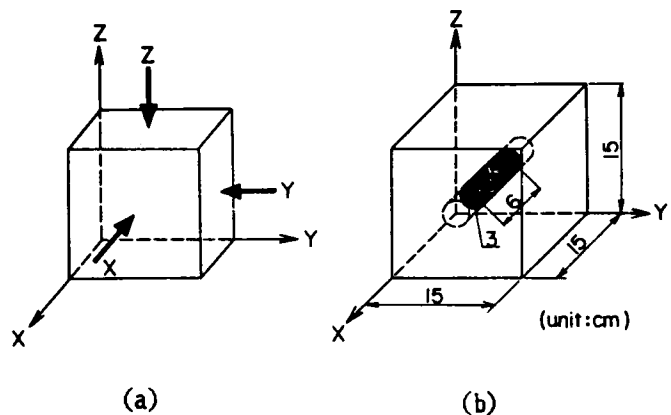


図-3-1 (a)：立方供試体と応力作用方向

(b)：立方供試体から切出した円柱供試体

目の除荷時の残留ひずみを除いた繰返し10 回における残留ひずみの量（図-3-2の b）はひずみ飽和とみなした 50 回の繰返し载荷の残留ひずみから 1 回目の残留ひずみを除いた量 a の約 77 %になっていた。なお、50 回の繰返し载荷後の残留ひずみの量（約 0.0334 %）は同種の花崗岩をひずみの増加が止るまでクリープ（その期間約 7 日）させたときの残留ひずみの量とほぼ等しかった。

上述の方法で作成したひずみ飽和状態とひずみ不飽和状態の供試体に、応力制御方式で応力を単調増加させて一軸圧縮試験を実施し、同時にAEの観測を行い、応力一軸ひずみ一AE累積数関係を表したのが図-3-3,4(a)(b)である。図-3-3（生駒産の花崗岩）より、繰返し回数が 10 回（ひずみ不飽和状態）では、与えた軸応力が 150kgf/cm^2 であるにもかかわらずカイザー効果より求めた先行軸応力は 128kgf/cm^2 となり、かなり低い値となっていた。一方、繰返し回数 50 回（ひずみ飽和状態）の供試体では、与えた軸応力 150kgf/cm^2 に対し、カイザー効果を利用して求めた先行軸応力は 153kgf/cm^2 となっていた。したがってAEのカイザー効果を利用して先行軸応力を求める場合少なくともひずみ飽和状態の供試体でなければ正確な値を求めることができないことが確かめられた。ここに挙げた試料は生駒産および稲田産の一例であるが他の試料についても同様な結果が得られた。

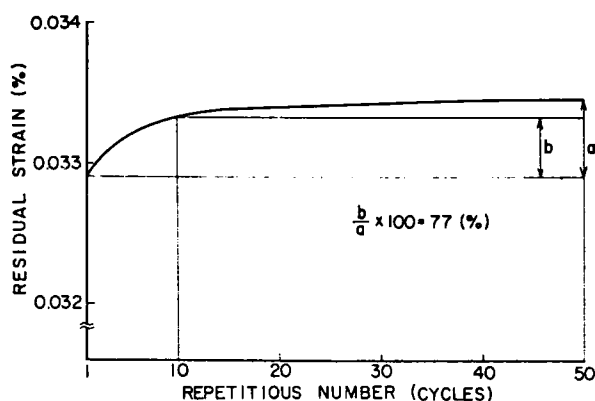
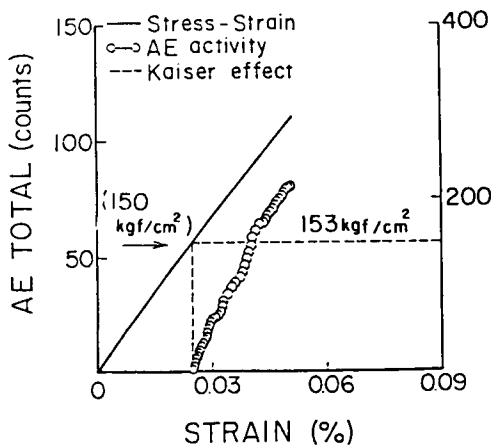


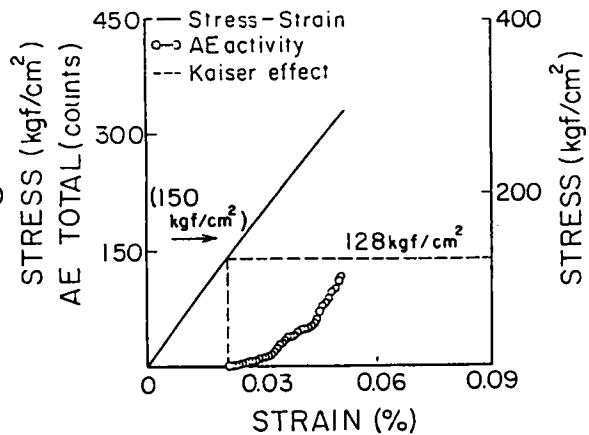
図-3-2 残留ひずみと繰返し回数の関係

3-2 実験Ⅱの結果と考察

図-3-2(a)に示した、大きさ $15 \times 15 \times 15\text{cm}$ の立方供試体に大きさの異なる 2 方向の応力（X 方向： 100kgf/cm^2 , Y 方向： 150kgf/cm^2 , Z 方向：繰返し応力は無载荷）を順次繰返し载荷によって与え、X, Y 両方向とも 10 回の繰返しと 50 回の繰



(a)

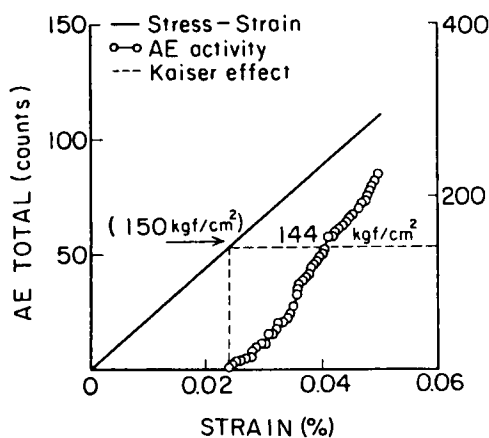


(b)

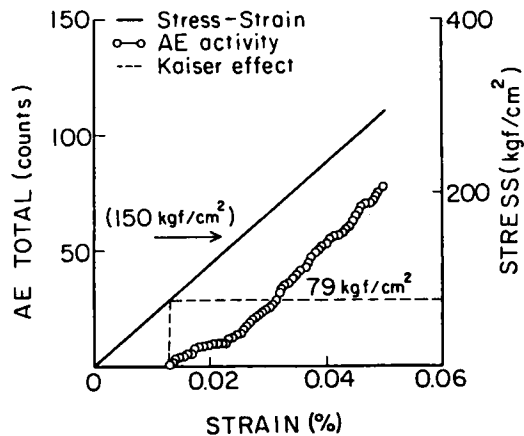
図-3-3 応力-軸ひずみ-AE累積数関係 (生駒産)

(a) : 繰り返し 50 回の場合 (ひずみ飽和状態)

(b) : 繰り返し 10 回の場合 (ひずみ不飽和状態)



(a)



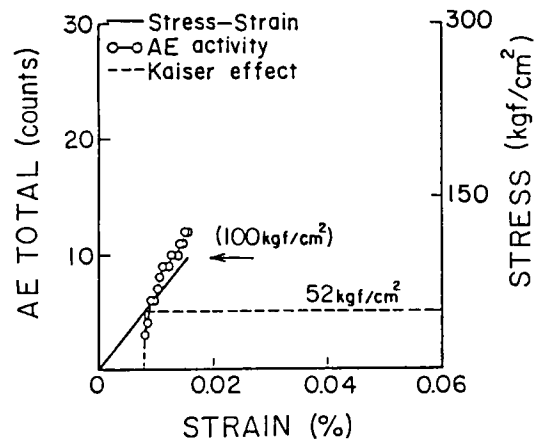
(b)

図-3-4 応力-軸ひずみ-AE累計数関係 (稲田産)

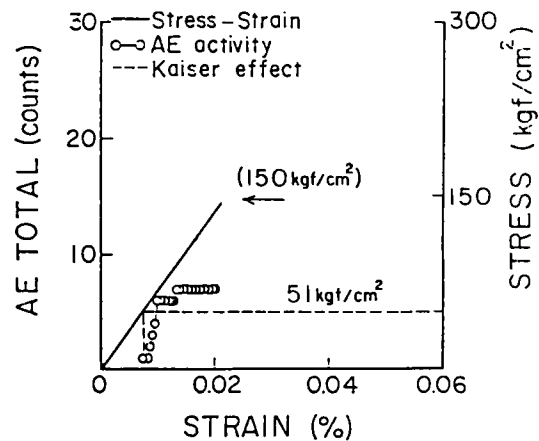
(a) : 繰り返し 50 回の場合 (ひずみ飽和状態)

(b) : 繰り返し 10 回の場合 (ひずみ不飽和状態)

り返しの違いがAEのカイザー効果より求められる先行軸応力にどのような影響をもたらすかを調べた。まず立方供試体の X 方向に 100kgf/cm^2 の応力で繰り返し載荷を 10 回行い供試体を 90° 回転させて Y 方向に 150kgf/cm^2 で 10 回の繰り返し載荷を行ったのち、再び X 方向に供試体の軸の向きを変えて、X 方向の応力を 100kgf/cm^2 以上 118.4kgf/cm^2 まで単調に増加させた。その結果、応力-軸ひずみ-AE累積数関係を示したのが図-3-5(a)(b) である。図 (a)より X, Y それぞれの方向に与えた繰り返し載荷の軸応力が 100kgf/cm^2 と 150kgf/cm^2 であるにもかかわらず X 方向の載荷で得られた、カイザー効果より求められる X 方向の先行軸応力は 52kgf/cm^2 (生駒産)であった。つぎに供試体軸を Y 方向に向きを変え 170.4kgf/cm^2 まで単調載荷を行ってカイザー効果より Y 方向の先行軸応力を求めた結果は図 (b) のように 51kgf/cm^2 (生駒産)であった。このことは、図-3-3に示した供試体への載荷の際、残留ひずみの増進がみられる段階(ひずみ不飽和状態)で載荷を終えたことにも一因があると考えられる。



(a)



(b)

図-3-5 繰り返し 10 回の応力-軸ひずみ
 -AE累積数関係

(a) X 方向 先行軸応力 100kgf/cm^2

(b) Y 方向 先行軸応力 150kgf/cm^2

一方、上述のような载荷順序でひずみ飽和状態とした供試体を用いた場合のカイザー効果は、X 方向については図-3-6(a) のように 102kgf/cm^2 (生駒産) において、また Y 方向については (b) が示すように 144kgf/cm^2 (生駒産) から AE の発生がみられ、X, Y 両方向とも与えた軸応力付近から AE が発生しており、カイザー効果から推定される先行軸応力は X, Y 両方向ともそれぞれの方向に与えた軸応力を 2 ~ 3 % の誤差範囲で推定することができる。ゆえに AE のカイザー効果から各方向の先行軸応力を求めるには、上述の実験のように、各方向の残留ひずみの状態がともにひずみ飽和状態の試料でなければならないことがわかる。

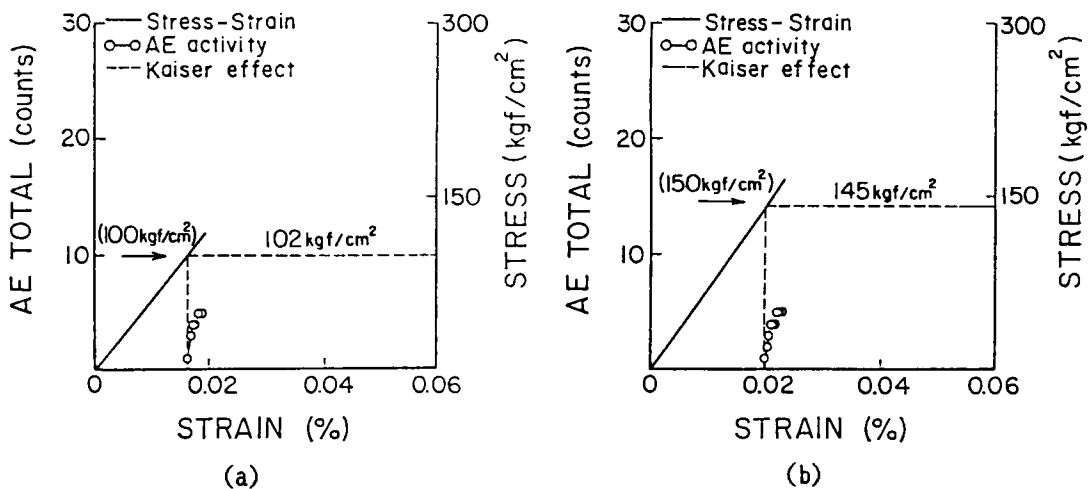


図-3-6 繰り返し 50 回の応力-軸ひずみ-AE累計数関係

(a) : X 方向 先行軸応力 100kgf/cm^2

(b) : Y 方向 先行軸応力 150kgf/cm^2

3-3 実験Ⅲの結果と考察

次に大きさの異なる 3 方向の軸応力を別々に与えたひずみ飽和状態の供試体の各方向に与えた軸応力が AE のカイザー効果から推定される先行軸応力とどのような関係にあるかを調べた。大きさ $15 \times 15 \times 15\text{cm}$ の立方供試体に、図-3-2(a) のように X 方向に 10kgf/cm^2 , Y 方向に 150kgf/cm^2 そして Z 方向に 200kgf/cm^2 の応力を 50 回の繰り返し载荷によって順次与えた。その後、この供試体の X 方向に再び 118.4kgf/cm^2 まで応力を

単調載荷したときの応力—軸ひずみ—AE累積数の関係を示すと図-3-7 のようになる。

図よりカイザー効果から推定される先行軸応力は 99kgf/cm^2 （生駒産）であり、この供試体の X 方向に予め与えた軸応力が 100kgf/cm^2 であることを考えれば、X 方向に関するカイザー効果より求められる先行軸応力は他方向（Y : 150kgf/cm^2 , Z : 200kgf/cm^2 ）からの応力の影響を受けていないことがわかる。試験順序を（方向：主応力値）、添字として繰り返し回数の記号で、また矢印を試験順序で略記することにし、上記を記号化すれば、（X : 100）₅₀ → （Y : 150）₅₀ → （Z : 200）₅₀ → （X : 118.4）₁ となる。同様に、（X : 100）₅₀ → （Y : 150）₅₀ → （Z : 200）₅₀ → （Y : 170.4）₁ と（X : 100）₅₀ → （Y : 150）₅₀ → （Z : 200）₅₀ → （Z : 220.4）₁ の場合の結果をそれぞれ図-3-8 , 9 に示す。図-3-7 ~ 9 により得られた結果をまとめると表-3-1 のようになる。表より、各方向に初期に与えられた軸応力は、他方向へ全く影響しないことがわかる。以上より残留ひずみが一定になるまで繰り返し載荷によって 3 方向の軸応力が与えられた供試体においては、カイザー効果を利用することにより、それぞれの方向に与えた軸応力を約 2 % の誤差内で推定できる。

同様にひずみ飽和になるように、大きさの異なる 3 方向の軸応力を順次繰り返し与えた立方供試体の中央部から図-3-2(b) のように円柱供試体（直径 3cm, 高さ 6cm）を切り出し、X 方向の先行軸応力を求めたのが図-3-10(a)(b)(c)である。一例として図(a)は、

（X : 100）₅₀ → （Y : 150）₅₀

→ （Z : 200）₅₀ の軸応力を受けた立方供試体の X 方向を軸方向として切り出した円柱供試体に 120.4kgf/cm^2 まで軸応力を単調載荷したときの応力—軸ひずみ—AE累積数の関係を描いたものである。図より、カイザー効果から推定される先行軸応力は 99kgf/cm^2 となっている。したがって X , Y , Z の各軸方向において残留ひずみがほぼ飽和した試料では、AEのカイザー効果を利用すること

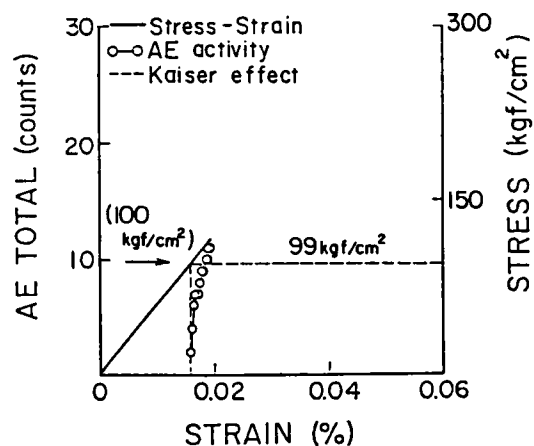


図-3-7 繰り返し 50 回の応力—軸ひずみ—AE累積数関係（X 方向）

により、その試料の各面に与えた軸応力を精度よく求めることが可能であると考えられる。また、他方向（Y, Z）から切出した試料においても同様な結果が得られた。なお、図の例に示したサンプルはすべて生駒産であるが、稲田産の試料においても同様なことが認められた。

3-4 実験Ⅳの結果と考察

花崗岩供試体への三軸繰返し載荷時における鉛直軸方向の変位と繰返し回数との関係を示したのが図-3-11である。図より、繰返し回数 50 回位になると残留変位の増加がほとんど認められない、いわゆるひずみ飽和状態となっている。一方、繰返し 10 回では、明らかに残留変位の増加が認められる。この状態を三軸におけるひずみ不飽和状態とした。実験は表-3-2に示すように鉛直軸圧と側圧を種々の組み合わせで行い、これを繰返し 10 回と 50 回の 2 種類について行っ

た。一例として鉛直軸圧 $\sigma_1 = 120 \text{ kgf/cm}^2$ 、側圧 $\sigma_2 = \sigma_3 = 50.0 \text{ kgf/cm}^2$ （ $\sigma_1 / \sigma_3 = \text{const.}$ の比例制御で応力比 2.4）の高圧三軸による 10 回と 50 回の繰返し載荷後、一軸圧縮試験における応力-軸ひずみ-AE累積数関係を示したのが図-3-12(a)(b)である。図より 10 回の繰返しの場合では、カイザー効果より推定される先行軸応力は 52 kgf/cm^2 であり、当初作用させた鉛直軸圧 120.1 kgf/cm^2 に比較して相当低い値であった。一方繰返し 50 回の場合では、 117 kgf/cm^2 となり繰返し載荷により作用させた鉛直軸圧 120.1 kgf/cm^2 の近傍であった。いずれの σ_1 と σ_3 の組合せにおいても

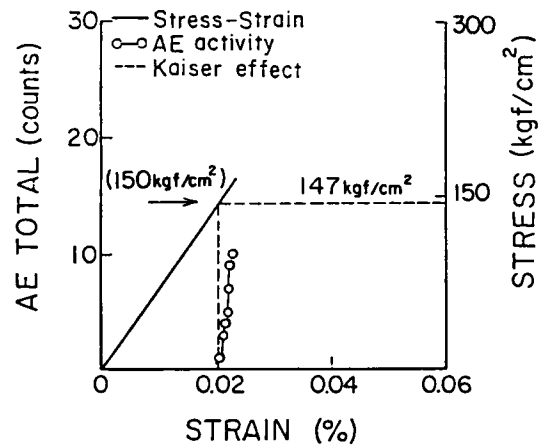


図-3-8 繰返し 50 回の応力-軸ひずみ
-AE累積数関係 (Y 方向)

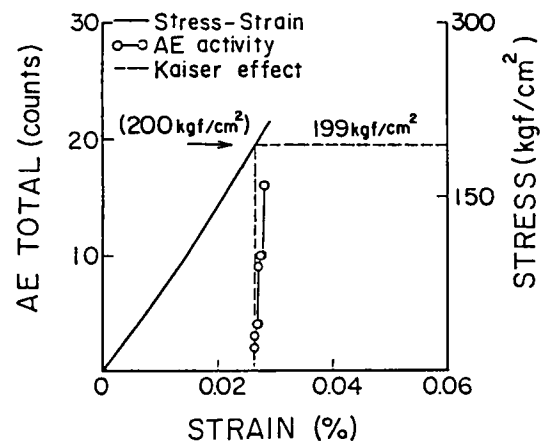


図-3-9 繰返し 50 回の応力-軸ひずみ
-AE累積数関係 (Z 方向)

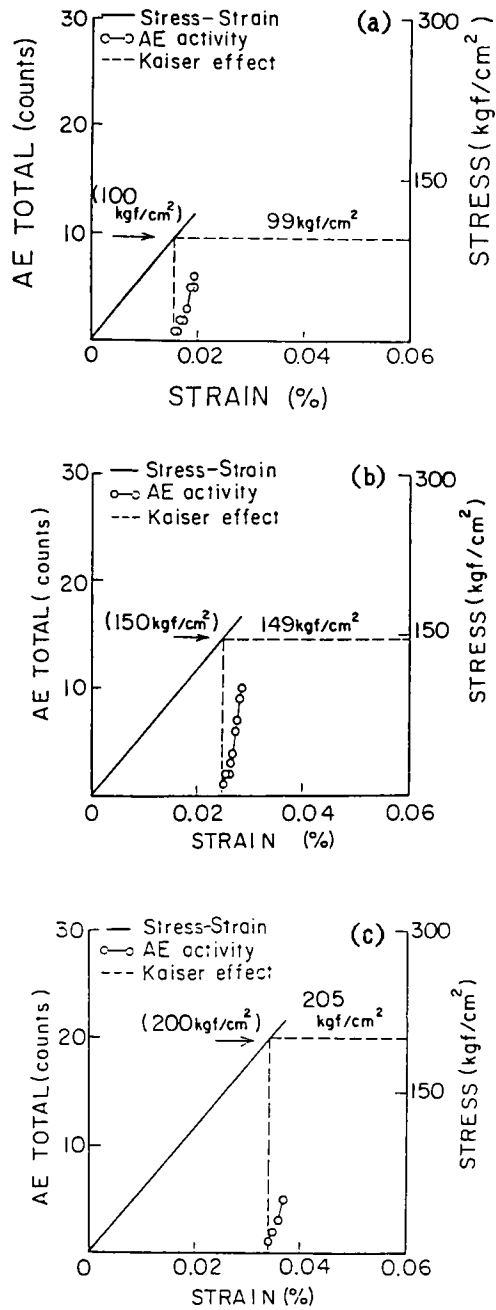


図-3-10 立方供試体から切出した円柱供試体

(a) X 面を軸とするもの

(b) Y 面を軸とするもの

(c) Z 面を軸とするもの

表-3-1 先行軸応力と推定応力

	X 方向	Y 方向	Z 方向
繰り返し 50 回により与えた軸応力 (kgf/cm ²)	100	150	200
カイザー効果より得られた先行応力 (kgf/cm ²)	99	147	199
誤差 (%)	1	2	0.5

表-3-2 鉛直圧と側圧

	鉛直圧 (kgf/cm ²)	側圧 (kgf/cm ²)
1	50	50
2	70	50
3	80	50
4	100	50
5	120	50
6	150	50
7	200	50
8	80	80

同様な結果が得られ、当初供試体が受けた応力状態に差があっても、供試体がひずみ飽和状態であればカイザー効果より得られた値は全て繰り返し時に与えた鉛直軸圧 σ_1 の近傍である。このことは、AE測定時において、測定された軸方向のひずみがほぼ飽和しておれば、載荷方法のいかんにかかわらず、カイザー効果より推定される先行軸応力は、その軸方向に予め与えた応力にほぼ等しくなっていることがわかる。なお、表-3-3 はひずみ飽和状態における試料の鉛直軸圧とカイザー効果より推定される応力とを比較し、その誤差を求めたものである。

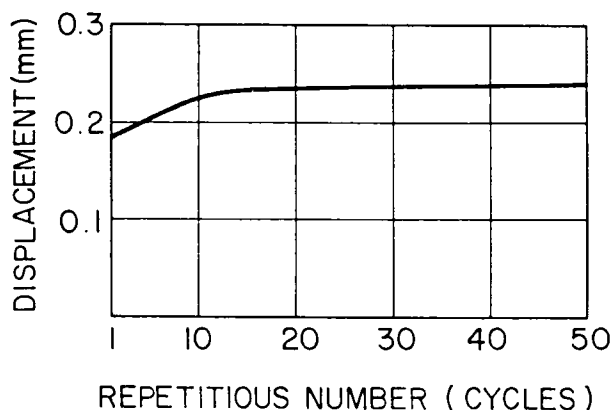


図-3-11 繰り返し回数と変位の関係

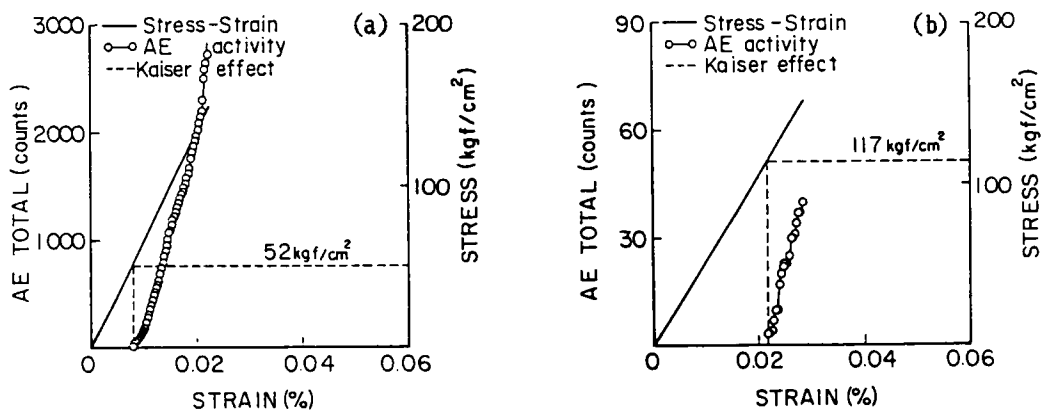


図-3-12 三軸圧縮による繰返し 10 回と 50 回の

応力-軸ひずみ-AE累計数関係

(a) 繰返し 10 回

(b) 繰返し 50 回

表-3-3 鉛直圧とカイザー効果より

推定される軸応力との比較

	鉛直圧 (kgf/cm ²)	推定軸応力 (kgf/cm ²)	誤差 (%)
1	50	48.2	3.6
2	70	70.9	1.3
3	80	82.2	2.8
4	100	99.2	0.8
5	120	116.6	2.8
6	150	150.9	0.6
7	200	200.9	0.5
8	80	80.7	0.8

第4節 結論

種々な載荷方法で予め軸応力を与えた花崗岩のカイザー効果について得られた結果をまとめると以下ようになる。

(1) 大きさの異なる軸応力を各面に繰り返し載荷によって与えた立方供試体においては、各軸応力方向において残留ひずみが一定になるまで載荷が行われた供試体（ひずみ飽和状態の場合）のみ、カイザー効果から載荷方向ごとの先行軸応力を高い精度で見出すことができる。これに対し、残留ひずみの増加がなお認められる状態で載荷を中止した、いわゆるひずみ不飽和状態の供試体においては、AEより求められる先行軸応力は当初与えた軸応力よりも小さな値となる。このことより、花崗岩におけるAEのカイザー効果は、ひずみ飽和の程度に影響していると考えてよい。

(2) 上記(2)と同じ載荷方法で、残留ひずみが一定になるまで軸応力を繰り返し与えた立方供試体の中央部から一表面に垂直に円柱供試体を切り出し、この供試体のカイザー効果から先行軸応力を推定した結果は、その面に与えた軸応力の1%の誤差内にあった。したがって、載荷方向の岩石試料がひずみ飽和状態であれば、AEのカイザー効果を利用することによって、その載荷方向に与えた軸応力を他の方向の載荷と無関係に精度よく推定することが可能であるといえる。

(3) 円柱供試体に繰り返し三軸圧縮を行い、鉛直軸方向において、ほぼひずみ飽和状態の試料であれば、カイザー効果より当初鉛直軸方向に与えた応力にほぼ等しい値が得られ、側圧の大小にはほとんど影響を受けないことが明らかとなった。しかしながら、ひずみ不飽和状態の場合では当初与えた鉛直軸圧よりもかなり小さな値となることがわかった。

参考文献

- 1) Obert,L.and Duvall,W. : Use of Subaudible Noises for the Prediction of Rock Bursts, Part 2 ,U.S.Bureau of Mines.1942.
- 2) Kaiser,J. : Untersuchungen uber das Auftreten Gerauschen beim Zugversuch, Arkiv fur das Eisenhuttententwesen,Vol.24,pp.43-45,1953.
- 3) Goodman,R.E. : Subaudible Noise during Compression of Rocks,Geol.Soc.Bull. Vol.74,pp.487-490,1963.
- 4) 金川 忠・林 正夫・仲佐博裕：岩石における地圧成分のアコースティックエミッションによる試み、土木学会論文報告集、第258号、pp.63-75.1977.
- 5) 楠瀬勤一郎・西沢 修・伊藤久男・石土経士・長谷川 功：岩石の一軸圧縮試験におけるAE発震機構、地震、第34巻、第2号、pp.241-250,1981.

第4章 花崗岩のクリープひずみ とカイザー効果の関係

第1節 序論

アコースティック・エミッションのカイザー効果を利用し、岩盤が受けている地圧を推定する試みは、これまでに二三次行われている¹⁾²⁾³⁾。しかしながら、解明されなければならない問題点も数多く残されている。その問題点の一つに、カイザー効果により推定された見掛けの先行応力が果たしてどのような場合の値を意味するのか、過去に受けた最大の応力なのか、あるいはそれがなんらかの影響を受けているのかということである。地山における岩盤の応力状態は複雑で、一般に三次元応力状態のもとで長期間にわたり種々の応力を受け、また、その応力は厳密に言えば、時とともに変化しているが、その応力下でのクリープ変形はほぼ完了していると考えられる。

著者らは、第3章において、花崗岩におけるカイザー効果は、供試体に与えた応力よりも、供試体の残留ひずみと大きく関係していることを述べてきた。例えば、繰り返し荷重を与えた岩石供試体でのAE試験によると、繰り返し回数を多くし、残留ひずみの増加がなくなった状態（繰り返しによるひずみ飽和状態）であれば、繰り返しにより与えた応力値においてAEが発生し始めるが、繰り返し回数が少ない、すなわち残留ひずみの増加が認められる状態（ひずみ不飽和状態）では、繰り返しにより与えた応力よりも小さい値でAEが発生し始めることを第3章において明らかにしている。

ここでは、岩石の受けていた地圧をAEによって推定する上で、問題点の一つと考えられるクリープによる残留ひずみとカイザー効果の関係を調べるために、供試体に一軸圧縮応力を与えて、クリープさせたのち、AE試験を行った。その結果、この場合においても岩のカイザー効果はクリープ応力により生じる残留ひずみに大きく依存することが明らかになった。またAEのカイザー効果を利用して、岩盤が受けていた地圧を推定する場合に供試体の残留ひずみの重要性に対する一つの知見を得ることができた。

第2節 試料、実験装置および実験方法

実験に用いた試料は、第3章で述べた生駒産及び稲田産の花崗岩であり、試料の性状等はここでは割愛する。

使用した実験装置は供試体に一軸圧縮を与えるためのクリープ試験機と載荷試験機ならびにAEの観測装置からなっており、供試体には最大荷重 14.7kN の簡易軟岩用クリープ試験機でクリープひずみを与え、またAE試験に用いた載荷試験機は最大荷重 98.0kN の万能試験機である。

本実験を行う前に、実験に用いた新鮮な花崗岩供試体の先行軸応力をAEを用いて予め求める目的で、一軸圧縮試験を行い、同時に発生するAEを測定し、カイザー効果よりこの供試体の受けていた先行軸応力を求めた結果は図-4-1のようになり、供試体の見掛けの先行軸応力は 82kgf/cm² であった。つぎに先行軸応力 82kgf/cm² の約 1.8 倍 (150kgf/cm²) の応力まで100kgf/cm²/min の載荷速度で応力を上げ、その応力のもとでひずみの増加がほぼ停止するまでクリープさせ、この状態を本実験における基本状態とした。なお、供試体のひずみは供試体の中央部の表面に取り付けた二個のひずみゲージ (一軸ゲージ、長さ 30mm) によって軸ひずみを計測した。上記のように一定荷重下でひずみの増加が停止する状態をクリープによるひずみ飽和状態といい、これに反し、ひずみの増加が認められる状態をひずみ不飽和状態ということにする。

この供試体を用いた試験としてはつぎの三種類のケースである。ケースAは供試体に一定のクリープ荷重を加えてひずみ飽和状態になるまでクリープさせた後除荷し、直ちにAEのカイザー効果を見るもの、ケースBはケースAと同じ載荷方法でひずみ飽和状態とするが、除荷後種々の長さの期間放置し、放置することにより起因するひずみの回復がカイザー効果に及ぼす影響を調べるもの、ケースCは供試体に載荷するクリープ荷重の大きさを減少させ、減少後の荷重でひずみ飽和にさせた場合のカイザー効果を見るためのものである。

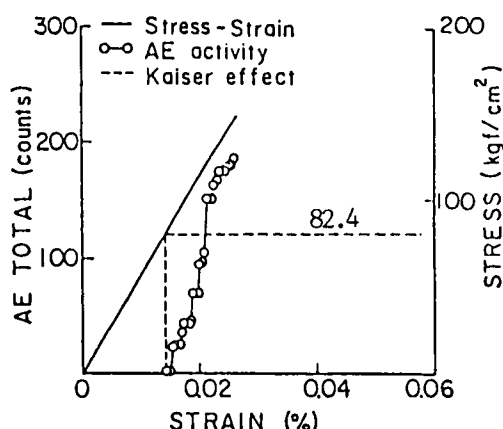


図-4-1 新鮮な試料における
AEのカイザー効果か
ら推定した先行地圧

以上のそれぞれ三種類の実験について方法、その結果および考察を次に述べる。

第3節 結果と考察

3-1 実験ケースA：ひずみ飽和状態におけるカイザー効果

クリープ試験機を用いて供試体に載荷し、 150kgf/cm^2 の一定軸応力下で、軸ひずみの増加がなくなる、いわゆるひずみ飽和状態となるまでクリープさせたのち除荷し、直ちに一軸圧縮を行い、同時にAEを測定した。なお、クリープ載荷期間は試料によって差はあるが、およそ7～10日間であった。図-4-2に実験結果の一例を示す。図-4-2の(a)は軸応力と軸ひずみおよびAEカウント・レートを示し、(b)は軸応力と軸ひずみおよびAE累積数を示している。図中破線はAE試験でのカイザー効果より推定した先行軸応力である。この結果推定された見掛けの先行軸応力は 153kgf/cm^2 で、最初に与えたクリープ応力 150kgf/cm^2 との間にはほとんど差のないことがわかる。また、 150kgf/cm^2 の応力下でのクリープしたひずみと除荷した直後の残留ひずみは図-4-2の応力-ひずみ曲線よりみれば、ほぼ等しいことが認められた。一方、他の供試体による同種の試験結果からも、AEにより推定される見掛けの先行軸応力と予め与えたクリープ応力との差は数パーセント以内であった。このことより、岩石供試体にクリープ荷重によってひずみ飽和状態となるまで載荷すれば、第3章で述べた、繰り返し荷重によるひずみ飽和状態におけると同様に、予め与えた応力をAE試験により数パーセントの誤差内で推定することが可能といえる。

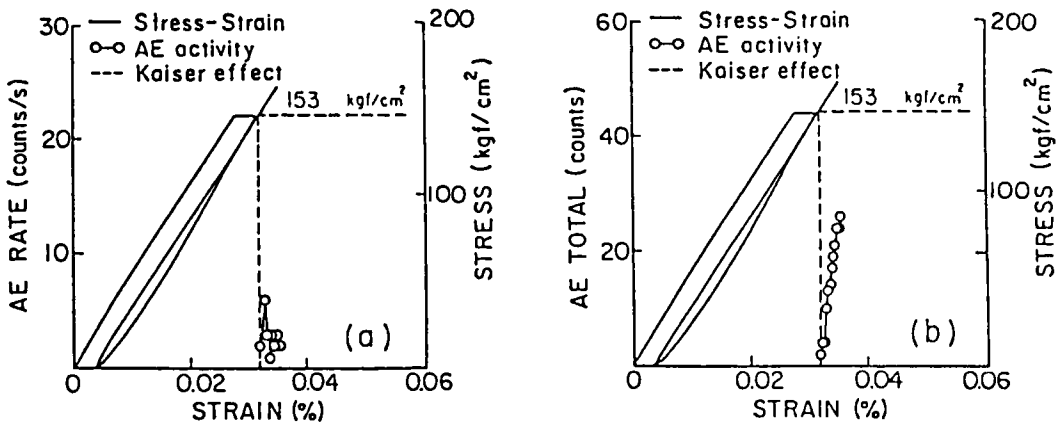


図-4-2 (a) 応力～軸ひずみ～AEレート

(b) 応力～軸ひずみ～AE累積数

3-2 実験ケースB：応力解放時間とカイザー効果の関係

供試体への載荷方法はケースAと同じで、 150kgf/cm^2 の応力下でクリープ試験機にかけ、ひずみ飽和状態となるまで載荷したのち除荷するが、ケースAと異なる点は除荷後恒温、恒室の場所で種々な長さの期間放置し、その間にひずみを回復させたのち、一軸圧縮試験を行い、AEを測定した点である。放置期間は、1.5 日、3 日、4 日、5 日、7.5 日、9 日、11.5 日、14 日および 20 日の 9 種類である。一例として、放置期間が 1.5 日、3 日、4 日、7.5 日、11.5 日および 20 日間の場合に対して軸ひずみがどれほど回復するかを示したのが図-4-3(a)(b)(c)(d)(e)(f)である。図より、放置期間が長ければ長いほど軸ひずみの回復量 ϵ_b が大きく、残留ひずみが小さくなっていることがわかる。そこで、これら各種期間放置した試料についてAE試験を行った。それらの一例として 1.5 日、3 日、4 日、5 日、7.5 日 および 20 日間の放置に対応するAE試験の結果が図-4-4(a)~(f)である。いずれの図も軸応力と軸ひずみおよびAE累積数関係を示している。これらの図よりAEが発生し始めたときの軸応力、すなわちカイザー効果より求めた見掛けの先行軸応力は表-4-1 に示す通りである。このように、放置期間が長ければ長いほど軸ひずみの回復量が大きく、一方カイザー効果より求められる見掛けの先行軸応力は小さくなっている。

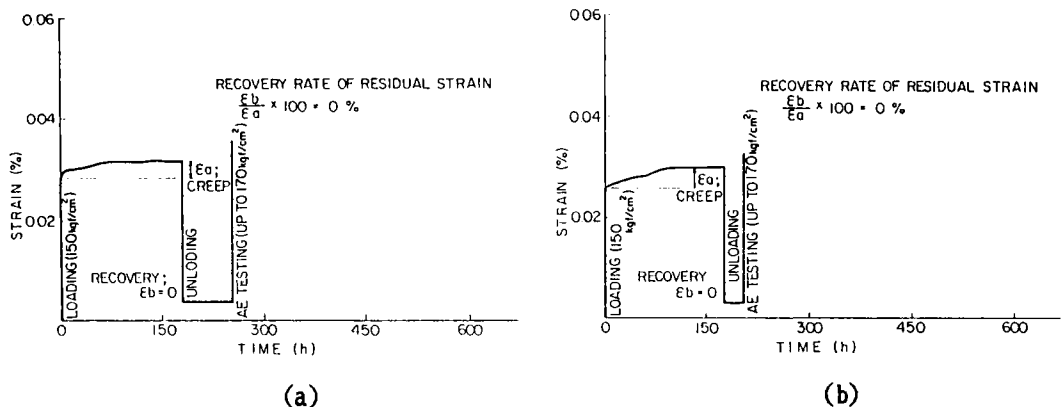
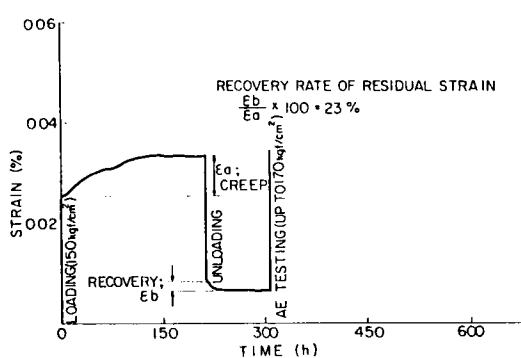
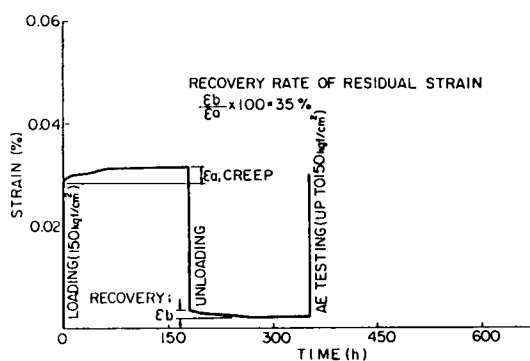


図-4-3 試料放置期間が 1.5 日 ~ 20 日におけるひずみの回復

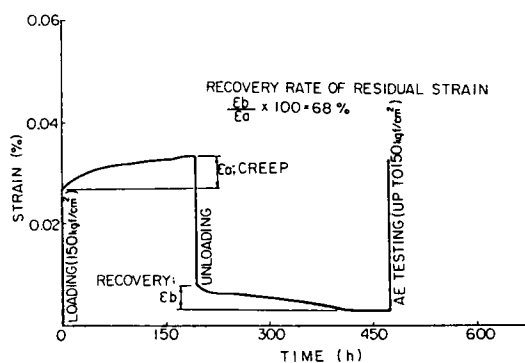
(a)1.5 日 (b)3 日 (c)4 日 (d)7.5 日 (e)11.5 日 (f) 20 日



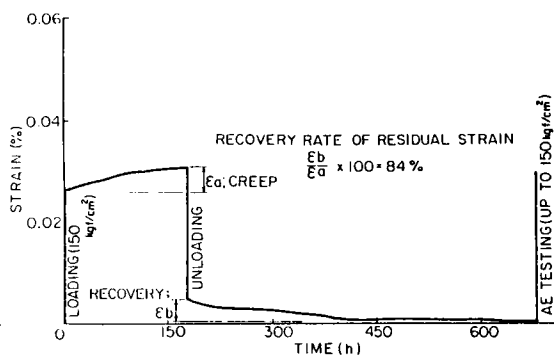
(c)



(d)



(e)



(f)

図-4-3 試料放置期間が 1.5 日 ~ 20 日におけるひずみの回復

(a)1.5 日 (b)3 日 (c)4 日 (d)7.5 日 (e)11.5 日 (f) 20 日

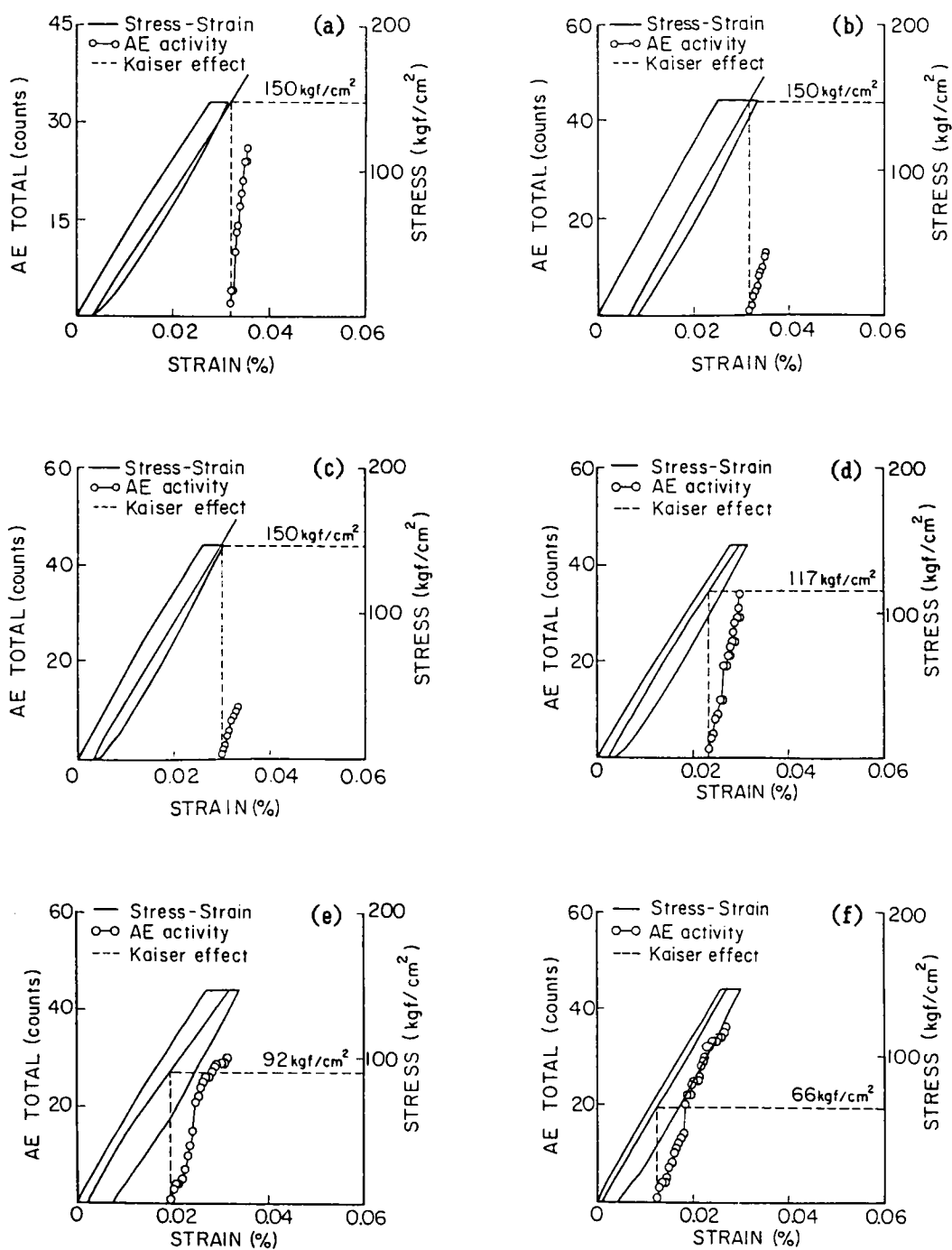


図-4-4 応力～ひずみ～AE累計数

(a) 放置期間 1.5 日 (b) 3 日 (c) 4 日

(d) 7.5 日 (e) 11.5 日 (f) 20 日

3-3 実験ケースC：階段荷重とカイザー効果の関係

まず実験Aで行ったと同様に供試体を一定のクリープ荷重（ 150kgf/cm^2 ）のもとでひずみ飽和状態とし、その後、載荷重を 150kgf/cm^2 の $2/3$ （ 100kgf/cm^2 ）の値となるまで一日間隔で 5 段階に分け除荷したもので一回に除荷した荷重は 10kgf/cm^2 であり、これを毎日つづけた。5 日後には、載荷重は 100kgf/cm^2 となり、その後 100kgf/cm^2 の応力をかけたままで 7 日間放置した。この放置後除荷して直ちに一軸圧縮試験を行い、AEを観測した。その結果を軸応力、軸ひずみおよびAE累積数関係で示した一例が図-4-5である。この図より、カイザー効果より推定される見掛けの先行軸応力は 101kgf/cm^2 で、5 段階に分けて除荷された最終の軸応力値が 100kgf/cm^2 であることを考えれば、カイザー効果より推定される見掛けの先行軸応力は実際に載荷した最終軸応力と良い対応を示している。なお、図-4-6は載荷重を段階的に除荷したことによるひずみの回復を示す経時変化曲線である。図より、軸ひずみは段階的に、かつ経時的に回復し、最終応力の時点では残留ひずみの回復はほぼ完了している様子がうかがわれる。したがって、岩石が受けている地圧が時とともに減少し、岩石のひずみが最終の応力のもとでひずみ飽和状態であれば、AE試験によって求められる見掛けの先行応力

表-4-1 試料放置期間と推定軸応力

放置期間 (日)	推定軸応力 (kgf/cm^2)
1.5	149
3	150
4	149
5	138
6	132
7.5	118
11.5	92
20	66

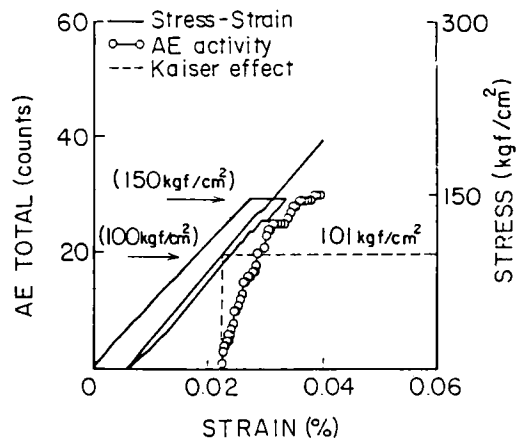


図-4-5 載荷重を段階的に減じた時の応力～ひずみ～AE累積数

は、最終時の載荷応力状態での地圧を示すであろうと推定される。

第4節 試料放置期間とカイザー効果より
求めた見掛けの先行軸応力の関係

前述の実験ケースBの結果をまとめると図-4-7のようになる。図は種々の長さの期間放置されたひずみ飽和の試料について放置期間を横軸にカイザー効果より求められた見掛けの先行軸応力を縦軸にとってプロットしたものである。図より放置期間が4日目位までは初期に与えた軸応力とカイザー効果より求めた見掛けの先行軸応力とはほぼ等しくなっており、それ以上の期間放置すれば、それに応じて与えた軸応力よりも小さな値になっている。

ケースBにおいて図-4-3に示すように

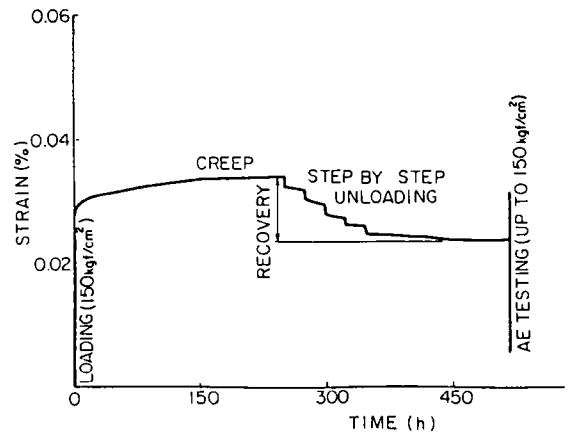


図-4-6 ひずみの回復と時間関係

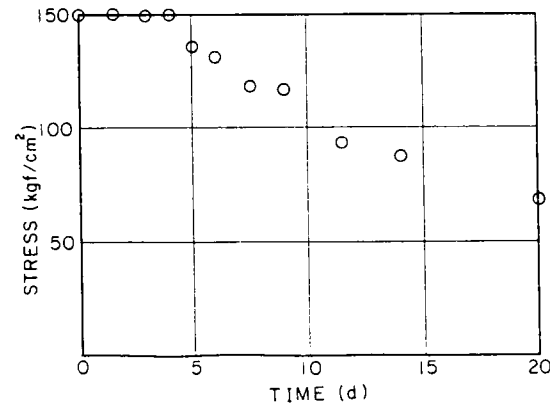


図-4-7 放置期間とカイザー効果より
求めた見掛けの先行軸応力の
関係

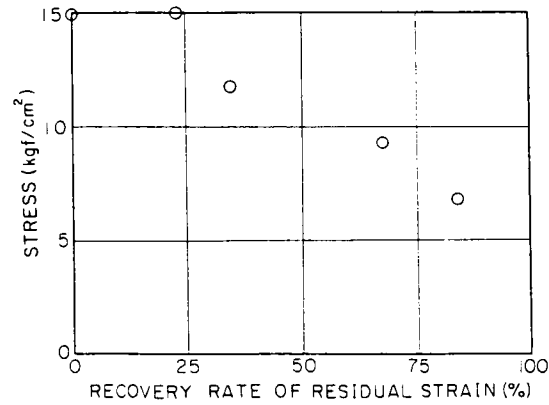


図-4-8 残留ひずみの回復率とカイザー
効果より求めた見掛けの先行軸
応力の関係

載荷直後からのクリープによる飽和ひずみを ε_0 、放置期間中に生じた回復ひずみを ε_b として $\varepsilon_b / \varepsilon_0$ の百分率を残留ひずみ回復率 (recovery rate of residual strain) とすると、これは次式で示される。

$$\text{残留ひずみの回復率} = (\varepsilon_b / \varepsilon_0) \times 100 \quad (\%)$$

そこで、図-4-7の横軸を残留ひずみの回復率にとれば図-4-8となる。図より、残留ひずみの回復率が 20 % 位以内であれば、カイザー効果より求められる見掛けの先行軸応力は予め与えた軸応力にほぼ等しくなっているが、残留ひずみの回復率が 20 % 以上になると、回復率が大きくなればなるほどカイザー効果より求められる見掛けの先行軸応力は与えた軸応力よりも小さな値となることがわかる。

図-4-7,8 をみると、試料がひずみ飽和の試料であっても、それを長期間放置すると、それだけ残留ひずみは回復し、同時にAEのカイザー効果から求められる見掛けの先行軸応力は予め与えた軸応力よりも小さく測定される傾向が一層明らかにわかる。

ただし、ここに述べた実験は試験室内で、ひずみ飽和状態とほぼ認められる程度になるまで載荷した試料についてのものである。そのため、クリープ期間はさほど長いものではなかった(載荷期間 7 ~ 10 日)。一方、地山の岩石は一般に極めて長期間載荷状態にあり、ほぼ完全に近いひずみ飽和状態であると考えられる。したがって、現地より採取した岩石と試験室で短期間の載荷をした岩石とでは、残留ひずみの回復の様相が異なるかも知れない。また、現地における岩石は三次元応力状態下でのクリープであり、今回の実験では一軸圧縮応力下におけるクリープ試験の結果である。これらの点はさらに検討を要することで今後究明するつもりである。

いずれにしてもAEのカイザー効果に対して図-4-7,8の傾向が存在していることが認められるので、地山から岩石試料を採取した後は、残留ひずみがあまり回復しない内にAE試験を行わなければ、カイザー効果より得られる地山での地圧を正確に求めることができないことが十分に推定される。

第5節 結論

AEのカイザー効果を利用し、岩盤の受けていた地圧を推定する際の基本的な問題点の一つと考えられるクリープひずみとカイザー効果の関係を解明するため、花崗岩供試体を用

いて三種類の実験を行った。その結果、AEのカイザー効果は残留ひずみに大きく依存することが明らかになった。これら三種類の実験から得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 岩石供試体が一定応力（一軸圧縮状態、以下同様）を長期間受け、クリープひずみが増加しない状態になった場合 — ひずみ飽和状態 — には、予め与えた軸応力はカイザー効果により数パーセント以内の誤差で推定される。ここでの試験結果では除荷時の残留ひずみは載荷以後にクリープによって生じたひずみにほぼ等しかった。

(2) 岩石供試体に一定応力をひずみ飽和状態になるまで（今回の実験では 7 ～ 10 日間）与えた後、除荷し放置すれば、放置期間が長ければ長いほど軸ひずみの回復量は大きくなり、それに伴ってカイザー効果より求められる見掛けの先行軸応力は小さく測定されるが、残留ひずみの回復率が約 20 % 以内（今回用いた試料では放置期間が 4 日以内）まででは、カイザー効果により求められる見掛けの先行軸応力は与えた軸応力にほぼ等しかった。しかしながら、残留ひずみの回復率が 84 % の場合では、カイザー効果より求められる見掛けの先行軸応力は、予め与えた軸応力の約半分の値となった。

(3) 岩石供試体にクリープひずみの増加が停止するまで一定応力を与え、いわゆるひずみ飽和状態とした後、荷重を段階的に減じ、減じた軸応力の下でクリープひずみが一定となるまで（今回の試験では 7 日間）放置した場合、カイザー効果より求められる見掛けの先行軸応力は、予め与えた先の軸応力値ではなく、減じた最終の軸応力値にほぼ等しくなる。いいかえれば、カイザー効果によって推定される見掛けの先行軸応力は必ずしも過去に受けた最大の軸応力ではなく、AE試験の時点において、その試料に残留ひずみを生じさせた軸応力が測定されることとなる。

以上の結論は短期間の一軸圧縮荷重の室内試験により得たものであって、実際の地山のような長期間三次元応力を受けたものではない。しかし、現地における岩石の地圧をカイザー効果によって求めようとする場合、クリープひずみとカイザー効果の関係についての本試験の傾向からみれば、地山から岩石試料を採取したのち、残留ひずみがあまり回復しないうちにAE試験を実施しないと、地圧を正確に求めることができないことは十分に推察される。

カイザー効果によって地山の地圧を求めようとする時、今後の問題点としては、室内試験と現地の地山内における岩石に与える載荷方法、載荷時間の差異を検討していくことが必要であろう。

参考文献

- 1) Kaiser, J. : Untersuchungen uber das Auftreten Gerauschen beim Zugversuch, Arkiv fur das Eisenhüttenwesen, Vol. 24, pp. 43-45, 1953.
- 2) 金川 忠、林 正夫、仲佐博裕 : 岩石における地圧成分のAcoustic Emissionによる推定の試み、土木学会論文報告集、第258号、pp. 67-75, 1977.
- 3) Murayama, S., Michihiro, K., Saito, J., Fujiwara, T., Yoshioka, H. and Hata, K. : The Kaiser Effect on a Granite under Various Loadings, Proceedings of the 7th International Acoustic Emission Symposium, pp. 586-593, 1984.
- 4) Yosikawa, S. and Mogi, K. : A New Method for Estimation of the Crustal Stress from Cored Rock Samples, Laboratory Study in the Case of Uniaxial Compression Tectonophysics 74 pp. 323-339, 1981.

第5章 種々な岩石における カイザー効果特性

第1節 序論

岩盤内に地下発電所のような空洞を構築する場合、通常はFEM解析によって空洞の支保設計を行うことが多い。FEMによる力学解析は、ある種の許容応力法であるため、設計外力として、岩盤が有する地圧を知ることが必要不可欠である。現在よく使われている地圧の推定方法には、オーバーコアリング法、ハイドロリック・フラクチャーリング法およびフラット・ジャッキ法等がある。しかしながら、これらの方法では、岩盤内における乱された領域で測定を行わなければならないという問題点がある。その上、測定のための装置が大がかりで、かつ多額の費用を要する。

これに対し、Acoustic Emissionにおけるカイザー効果現象を利用した地圧の測定法が確立すれば、試験法および経済的な面からも非常に有効な手段となりうる。

著者ら¹⁾²⁾はカイザー効果を利用して、岩盤の有する地圧を推定する上で、いくつかの問題点があることを第3章および第4章で述べた。すなわち、“岩盤内から採取された岩石試料は、応力解放に伴ってひずみの回復を生じるためカイザー効果より得られる応力は岩盤が本来有していた地圧よりも小さな値になるのではないか”。また、“カイザー効果より求められる応力は、その試料が過去に受けた最大の応力ではなく、AE試験時に残留しているひずみに大きく依存しているのではないか”といったことを指摘し、花崗岩供試体を用いて種々の実験を行った。その結果、一軸による繰返し試験およびクリープ試験によって供試体がひずみ飽和状態であれば、予め与えた先行軸応力はカイザー効果によって数%の誤差内でみい出すことができる。一方、ひずみ不飽和状態の試料では、カイザー効果より推定される先行軸応力は与えた応力よりもかなり低い値を示すことが明らかになった。

本章では、第3章および第4章における花崗岩のカイザー効果特性が他の岩種においてどの程度同一傾向を示すのかを調べるため、ここでは、砂岩、泥岩、凝灰岩、結晶片岩および大理石について、残留ひずみがカイザー効果に及ぼす影響を調べるとともに花崗岩における結果との比較検討を行った。

第2節 試料、実験装置および実験方法

実験に用いた岩石試料は凝灰岩（道上産）、砂岩（愛岐産）、泥岩（町田産）、結晶片岩（藤岡産）および大理石（イタリア産）の5種類である。供試体の形状は全て、直径約30mm、高さ約60mmの円柱体である。また、使用したそれぞれの岩石の一軸圧縮強度と単位体積重量は表-5-1の通りである。

実験に使用した試験機は、繰り返し載荷と単調載荷を行うための一軸圧縮試験機と、一定荷重を長期間作用させるためのクリープ試験機である。AEの観測装置は第2章で述べているのでここでは割愛する。

全ての実験において測定される量は、円柱供試体が一軸圧縮を受ける際に発生するAE、試料の軸ひずみおよび軸圧である。この時の軸圧の上昇速度は約100kgf/cm²/minとした。また、供試体の軸ひずみは供試体の中央部の表面に貼った2つのひずみゲージで測定した。

表-5-1 強度と単位体積重量およびサンプル数

岩石名	一軸圧縮強度(kgf/cm ²)	単位体積重量(tonf/m ³)	サンプル数
凝灰岩	1730~2100	2.49	30
砂岩	2400~2600	2.63	30
泥岩	30~ 40	1.87	30
結晶片岩	600~ 700	2.95	30
大理石	900~1000	2.70	10

実験方法は第3章および第4章で述べたが、ここでも簡単に説明をしておく。実験は5種類の岩石試料を用いて以下の3ケースについておこなった。

実験 I：一軸繰り返し試験

載荷-除荷の繰り返しによって軸ひずみの増加が認めらなくなった状態（ひずみ飽和状態）と、軸ひずみの増加が認められる状態（ひずみ不飽和状態）における各種供試体がか

イザー効果にどのような影響を及ぼすかを調べたものである。

実験 II：クリープ試験

一定軸応力下でクリープによる軸ひずみの増加が認められなくなった状態（ひずみ飽和状態）となおひずみの増加が認められる状態（ひずみ不飽和状態）における各種岩石供試体が、カイザー効果によりどのような値が得られるのかを調べたものである。

実験 III：階段荷重によるクリープ試験

一定のクリープ荷重のもとでひずみ飽和状態とし、その後、載荷重をクリープ荷重の $2/3$ の値となるまで一日間隔で 5 段階に分け荷重を除荷し、これを 5 日間つづけた。5 日後には、もとのクリープ荷重の $2/3$ となり、その後、この応力状態のまま 7 日間放置した。この放置後、荷重を除荷し直ちに一軸圧縮試験を行い AE を測定した。

第3節 実験結果と考察

3-1 実験 I の結果と考察

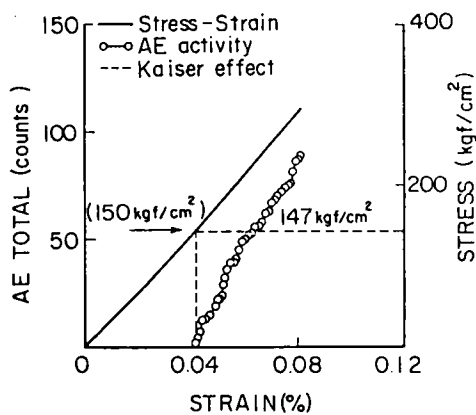
載荷－除荷（泥岩の場合は軸応力振幅は 10kgf/cm^2 で、他の岩種では 150kgf/cm^2 ）の一軸圧縮による繰返しにより、軸ひずみの増加がほぼ認められなくなった（ひずみ飽和状態、繰返し回数 50 回）各種供試体に繰返し終了後、直ちに一軸圧縮による単調載荷を行ったときの応力－軸ひずみ－AE 累積数関係が図－5-1(a)(b)(c)(d)(e)である。図より（一例として泥岩の場合）、カイザー効果より推定される見掛けの先行軸応力は 10.4kgf/cm^2 となっており、これは予め与えた繰返し軸応力 10kgf/cm^2 に対して約 4 % の誤差であった。

他の岩種については、表－5-2 に示す結果となった。

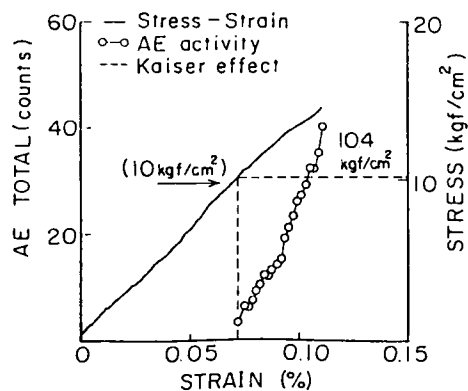
一方、軸ひずみの増加が認められる状態で載荷を中止した、いわゆるひずみ不飽和状態（繰返し回数 10 回）の各種供試体については、図－5-2(a)(b)(c)(d)(e) に示すように、カイザー効果より得られた見掛けの先行軸応力は表－5-2 が示す

表－5-2 推定応力の比較

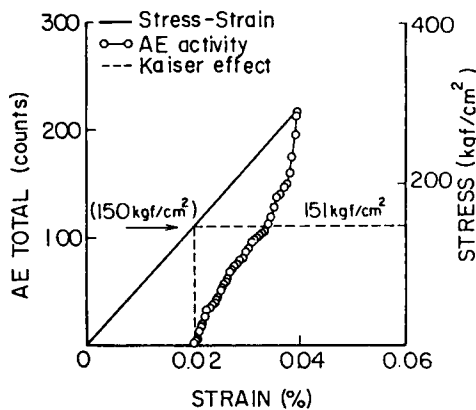
岩石名	繰返し 50 回	繰返し 10 回
凝灰岩	147kgf/cm^2	70kgf/cm^2
泥岩	10.4	2.5
砂岩	151	81
結晶片岩	153	49
大理石	—	—



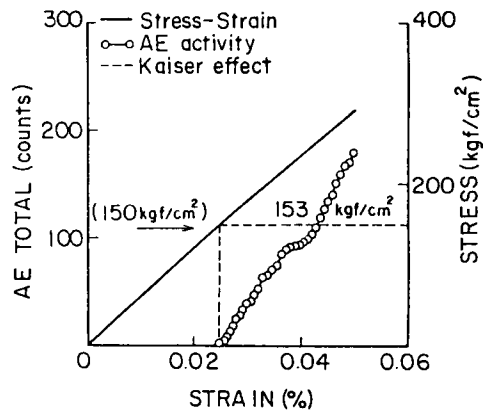
(a)



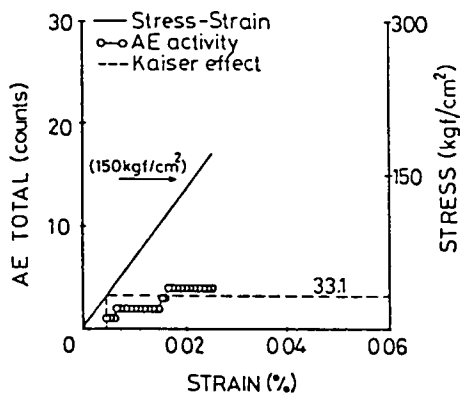
(b)



(c)



(d)



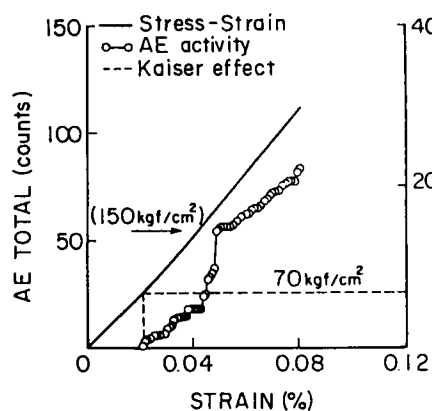
(e)

図-5-1 応力～軸ひずみ～AE累積数関係

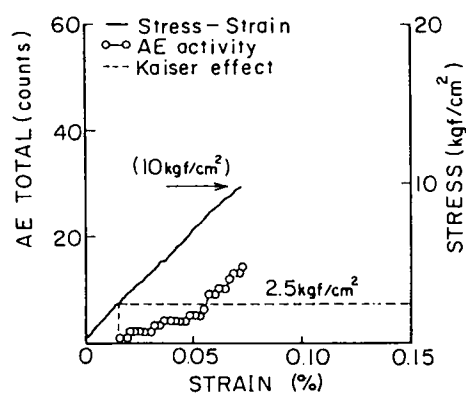
(繰返し回数 50 回)

(a) 凝灰岩 (b) 泥岩 (c) 砂岩

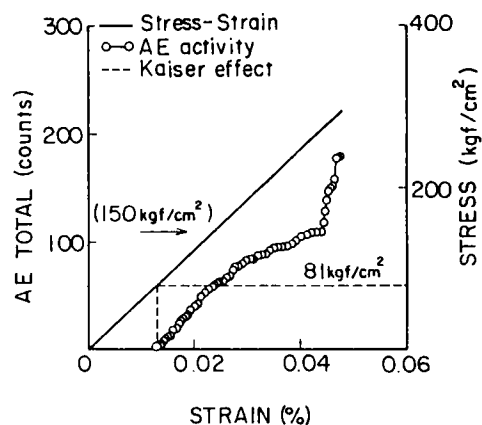
(d) 結晶片岩 (e) 大理石



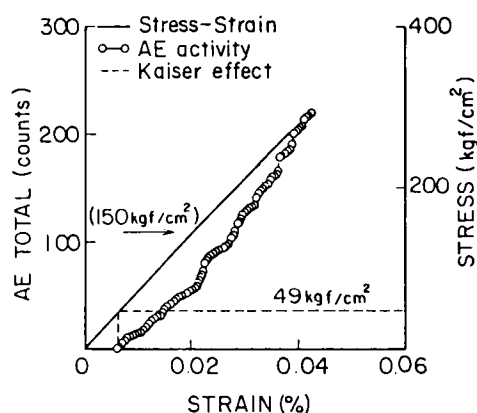
(a)



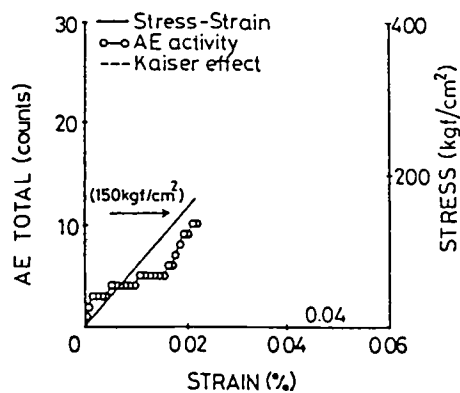
(b)



(c)



(d)



(e)

図-5-2 応力～軸ひずみ～AE累積数関係

(繰返し回数 10 回)

(a) 凝灰岩 (b) 泥岩 (c) 砂岩

(d) 結晶片岩 (e) 大理石

ように予め与えた軸応力に比べてかなり小さな値となっている。表-5-2に示したように大理石を除いた他の岩種については、第3章の花崗岩供試体の場合とほぼ同一傾向を示しており、すなわちカイザー効果現象を利用して岩石供試体の先行軸応力を推定する際には、ひずみ飽和状態の試料でなければ、予め与えた軸応力を正確に推定することができないことが確かめられた。このことは、供試体に与えた軸応力よりもむしろ供試体に生じたひずみの状態に依存していると考えられる。

しかしながら、大理石においては、数居値と増幅度を種々に変えて実験を行ったが、いずれの試料においてもAEがランダムに発生しカイザー効果現象は確認できなかった。その要因として以下のように6種類の岩石の成因、結晶の大小および一軸圧縮強度についての比較検討を行った。

(1) 成因による分類

- (a) 火成岩-----花崗岩
- (b) 堆積岩-----凝灰岩、砂岩、泥岩
- (c) 変成岩-----結晶片岩、大理石

(2) 結晶の大きさおよび種類による分類

- (a) 結晶粒が大きく多結晶-----花崗岩、凝灰岩
- (b) 結晶粒が小さく多結晶-----砂岩、結晶片岩
- (c) 結晶粒が大きく単結晶-----今回の試験において対象岩石なし
- (d) 結晶粒が小さく単結晶-----泥岩、大理石

(3) 一軸圧縮強度からの分類

- (a) 結晶間の結合力が大きい-----花崗岩、凝灰岩、砂岩、結晶片岩、大理石
- (b) 結晶間の結合力が小さい-----泥岩

以上の分類において、大理石は“結晶粒が小さく、単結晶であるが結晶間の結合力は大きい”分類に属しており、大理石の結晶は熱変成作用により均一な並びをしている。このため、外力に対して試料内部が部分的に破壊しないと考えられる。一方、泥岩は単結晶であるにもかかわらず結晶間の結合力が小さいため、他の岩種と同様に潜在的に試料内部に弱い部分が存在しており、部分的な破壊が生じると考えられる。このようなことから、大理石

においては、カイザー効果現象が確認できなかったと考えているが、まだ結論を出すには至っていない。

3-2 実験Ⅱの結果と考察

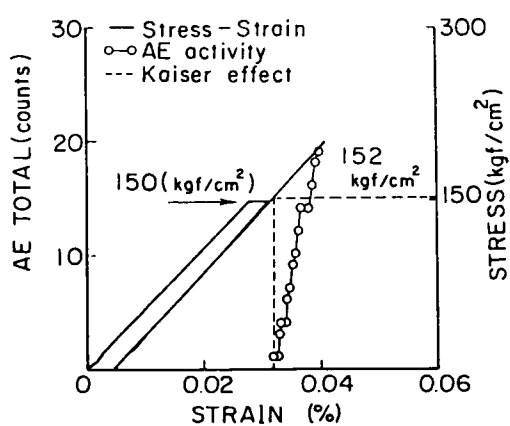
一定の軸応力（泥岩については 10.0kgf/cm^2 で他の岩種は 150kgf/cm^2 ）のもとで、軸ひずみの増加が認められなくなった状態（クリープによるひずみ飽和状態、載荷期間 7 ～ 10 日間）の各種供試体を用いてクリープ荷重除荷後、直ちに一軸圧縮による単調載荷試験を行ったときの応力と軸ひずみおよびAE累積数関係を図-5-3(a)(b)(c)(d)に示す。なお、図-(a)(b)(c)(d)それぞれの結果は、凝灰岩、泥岩、砂岩および結晶片岩である。一例として図-5-3(a)は、載荷期間が 7 日の凝灰岩試料であり、カイザー効果より得られた先行軸応力は 152kgf/cm^2 で、予め与えた軸応力 150kgf/cm^2 にほぼ等しかった。この例は凝灰岩の場合であるが他の 3 種の岩においても同様な結果で表-5-3に示す通りであった。

一方、一定軸応力を供試体に作用させ、軸ひずみの増加がなお認められる状態（ひずみ不飽和状態、載荷期間 2 時間）でクリープ荷重を除荷し直ちに単調載荷試験を行い、応力-軸ひずみ-AE累積数関係を示したのが図-5-4(a)(b)(c)(d)である。一例として図-5-4(a)は凝灰岩試料であり、予め与えた軸応力が 150kgf/cm^2 であるにもかかわらずカイザー効果より得られた見掛けの軸応力は 15kgf/cm^2 であった。他の試料についても同様な傾向であり、それらをまとめると表-5-3のようになる。

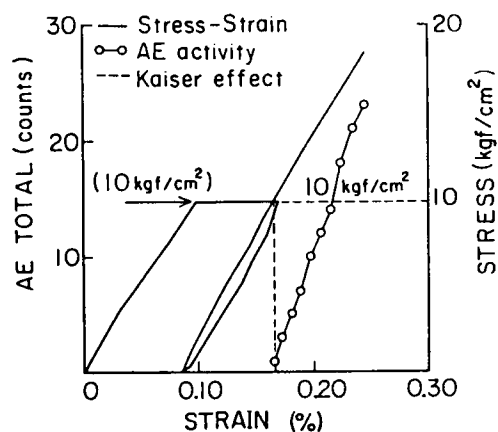
表-5-3 載荷期間の差異による推定応力の変化

岩石名	載荷期間 7 日	誤差	載荷期間 2 時間	誤差
凝灰岩	152kgf/cm^2	1.3%	15kgf/cm^2	90
泥岩	10	0	1.4	86
砂岩	154	2.7	24	84
結晶片岩	156	4	22	85

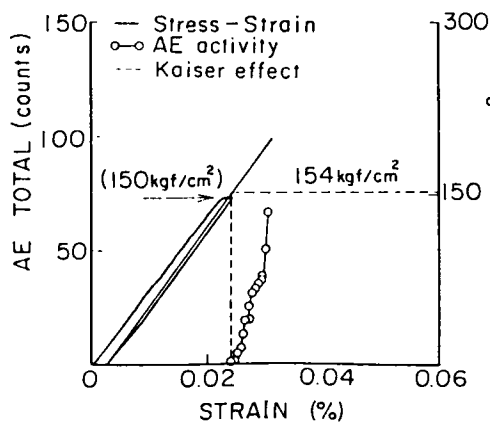
これらのことは、3-1で述べたように、繰り返し回数の違いにより、カイザー効果から得られる先行軸応力に大きな差が生じたことと同義で、この場合も載荷期間の違いにより供試体



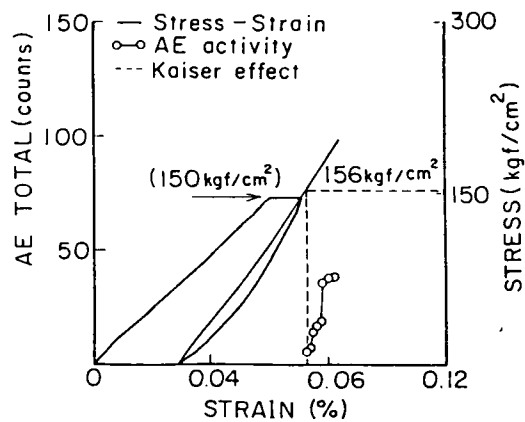
(a)



(b)



(c)



(d)

図-5-3 応力～軸ひずみ～AE累積数関係

(載荷期間 7 日間)

(a) 凝灰岩 (b) 泥岩 (c) 砂岩

(d) 結晶片岩

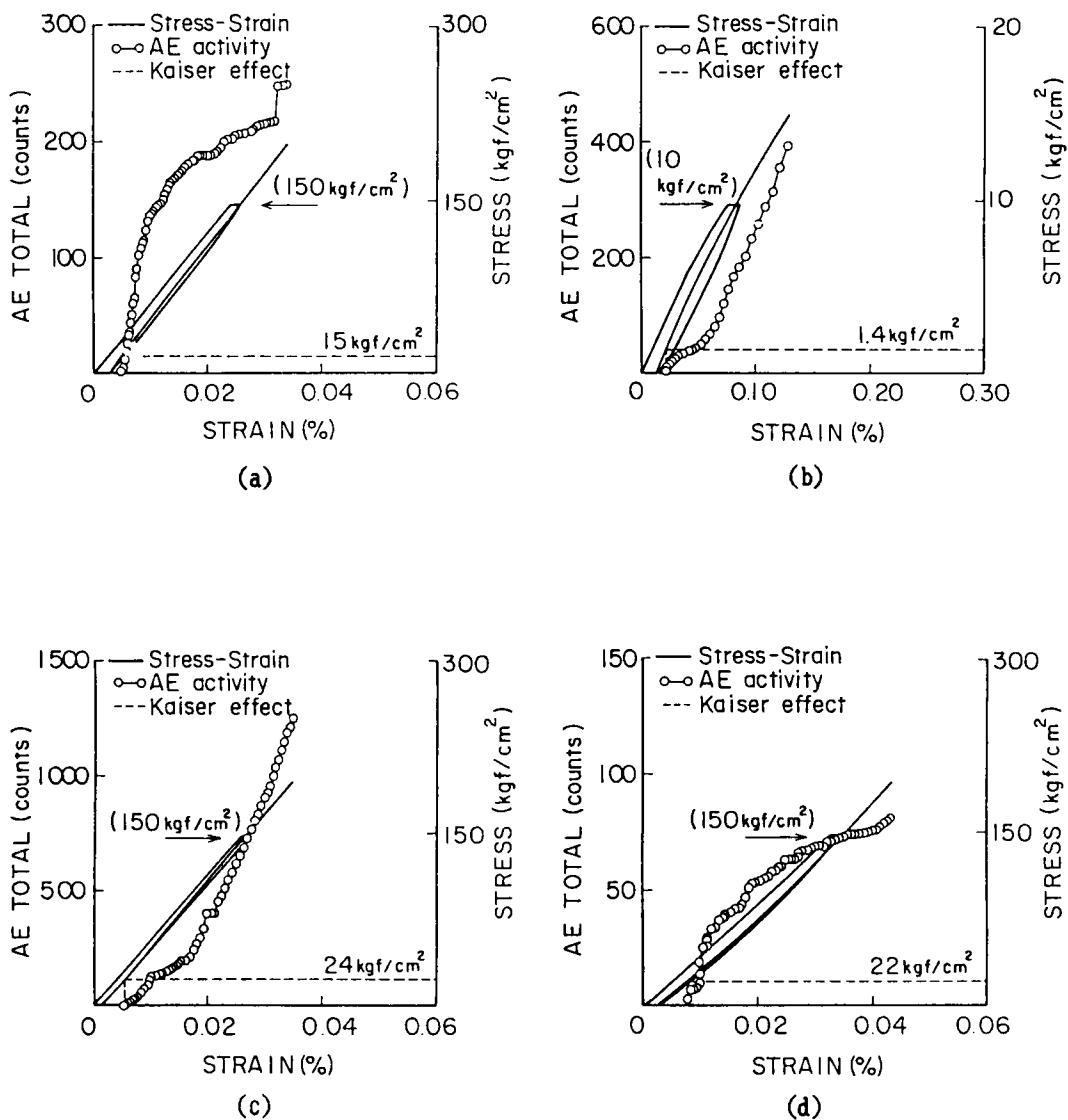


図-5-4 応力～軸ひずみ～AE累積数関係

(载荷期間 2 時間)

(a) 凝灰岩 (b) 泥岩 (c) 砂岩

(d) 結晶片岩

に生じるひずみがカイザー効果現象に大きな影響を及ぼしていることがうかがわれ、第4章において述べた花崗岩における結果と全く同一傾向を示していた。

しかしながら、3-1で述べたように大理石については、ひずみ飽和、不飽和のいかんにかかわらずカイザー効果現象は現われなかった。

3-3 実験Ⅲの結果と考察

一定のクリープ荷重 150kgf/cm^2 (泥岩は、 10kgf/cm^2) のもとでひずみ飽和状態とし、その後、載荷重を 150kgf/cm^2 の $2/3$ (100kgf/cm^2 , 泥岩は 6.5kgf/cm^2) の値となるまで1日間隔で5段階に分け載荷重を除荷し、5日後には、載荷重は 100kgf/cm^2 (泥岩は 6.5kgf/cm^2) となり、この応力状態のまま7日間放置した。その放置後、載荷重を除荷し直ちに一軸圧縮による単調載荷試験を行い、その結果を軸応力、軸ひずみおよびAE累積数関係で示した一例が図-5-5(a)(b)(c)(d)である。図-5-5(a)(b)(c)(d)はそれぞれ凝灰岩、泥岩、砂岩および結晶片岩を示している。これらの図より凝灰岩を一例にとると、カイザー効果より推定される見掛けの先行軸応力は 101kgf/cm^2 で5段階に分けて除荷された最終の軸応力値が 100kgf/cm^2 であることを考えればカイザー効果より推定される見掛けの先行軸応力は実際に載荷した最終の軸応力と良い対応を示しており、第4章で述べた花崗岩の場合と同様に、本章における他の岩種においても表-5-4に示すように同様の結果が得られた。

したがって、岩石が地山内で受けていた地圧が時とともに減少し、岩石のひずみが最終の応力状態でひずみ飽和状態であれば、AE試験によ

表-5-4 最終荷重と推定応力

岩石名	最終荷重	推定応力	誤差
凝灰岩	100kgf/cm^2	101	1%
泥岩	6.5	6.4	1.5
砂岩	100	104	4
結晶片岩	100	103	3

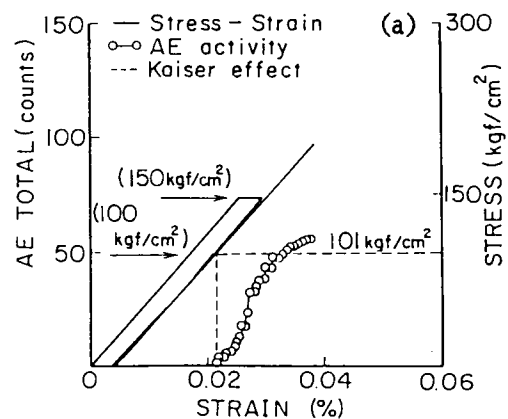
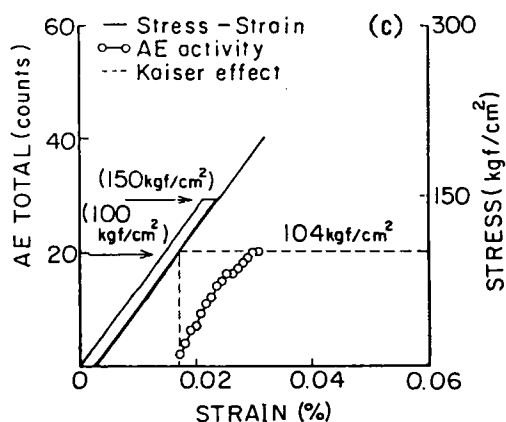
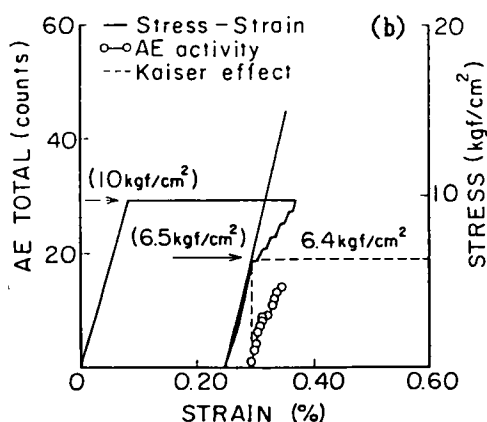


図-5-5 階段荷重における先行荷重とカイザー効果の関係



って求められる見かけの先行軸応力は最終時の载荷応力状態での地圧を示すであろうと推定される。

第4節 結論

第3章および第4章において、花崗岩供試体を用い、AEのカイザー効果特性を調べた結果、カイザー効果はAE試験時における残留ひずみに大きく依存していることを明らかにしたが、本章では、凝灰岩、泥岩、砂岩、結晶片岩および大理石の5種類の岩石を用いて、第3章および第4章と同様な試験を行い、残留ひずみとカイザー効果の関係を明らかにした。得られた結果をまとめると以下ようになる。

1) 一定振幅の軸応力で载荷-除荷を繰り返し行えば、最終的には残留ひずみの増

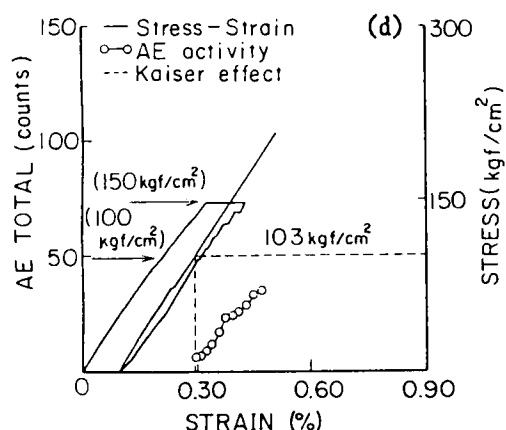


図-5-5 階段荷重における先行荷重とカイザー効果の関係
(a) 凝灰岩 (b) 泥岩
(c) 砂岩 (d) 結晶片岩

加が停止する状態（ひずみ飽和状態）になる。この状態における大理石を除く各種供試体では、AEのカイザー効果より得られる見掛けの先行軸応力は、予め与えた軸応力にほぼ等しくなった。しかしながら、軸ひずみの増加が認められる状態（ひずみ不飽和状態）で繰り返し載荷を中止した試料では、カイザー効果より得られる見掛けの軸応力は予め与えた軸応力よりもかなり小さな値となった。

2) 一定の軸応力下でクリープによるひずみの増加が停止した各種供試体（ただし大理石を除く）において、カイザー効果より得られる見掛けの先行軸応力は、先に与えた軸応力にほぼ等しくなった。しかしクリープによるひずみの増加が認められる状態で載荷を中止した場合においては、先に与えた軸応力よりもかなり小さな値となった。

3) したがって、結論 1), 2) より大理石を除く他の岩石におけるカイザー効果は、花崗岩と同様に、供試体に与えた応力よりもむしろ供試体に残留しているひずみに依存しているといえる。

4) 一定の軸応力下で、クリープひずみが一定になった後、軸応力を段階的に減じ、減じた軸応力の下でひずみの回復がなくなった各種供試体（大理石を除く）において、AEのカイザー効果より得られる見掛けの先行軸応力は、減じた最終の軸応力値にほぼ等しくなる。いいかえれば、カイザー効果より得られる見掛けの軸応力は必ずしも供試体が過去に受けた最大の軸応力ではなく、AE試験時に供試体に残留しているひずみに対応する応力を推定することとなる。

上記 1) ～ 4) までの結論の例外として、大理石では、カイザー効果現象は認められず、まだ結論を出すまでに至っていない。

参考文献

- 1) 村山朔郎・道広一利・斎藤二郎・吉岡尚也：載荷方法が花崗岩のカイザー効果に及ぼす影響、土木学会論文集、No.364, III-4, pp.107-112, 1985.
- 2) 村山朔郎・道広一利・藤原紀夫・畑 浩二：花崗岩のクリープひずみとカイザー効果の関係、土木学会論文集、No.370, III-5, pp.41-46, 1986.

第6章 応力の解放時間と カイザー効果の関係

第1節 序論

地山内における岩盤の地圧を測定する方法は、従来までに数々の方式が考案され実施されてきた。現在では、大別して応力解放法と水圧破碎の2つの方法が多く用いられている。応力解放法の代表的なものとしては、オーバーコアリング法¹⁾がよく知られている。また、その類似方法として Doorstopper 法²⁾などがある。応力解放法の原理は³⁾、地山の初期応力により潜在的に変形したりひずんだりしている岩盤内に測点を設け、つぎに、この周囲をボーリングやカッターなどを用いて切り透かし、測点を含む岩盤を無応力状態にし、その際の回復ひずみや変位を測定することによって、応力解放を行う前に作用していた応力、すなわち、初期応力を求めようとするものである。これに対して測定値がそのまま地圧として得られる方法、すなわちひずみや変位を介さないで直接地圧を求める方法にフラットジャッキ法⁴⁾と水圧破碎法⁵⁾がある。フラットジャッキ法は岩盤にスロット（幅の細い溝）を掘って部分的に応力を除荷し、その溝にフラットジャッキを入れ再々荷する。地圧は、溝を切り取った結果生じた変形をもとにもどすのに必要な圧として求められるものである。水圧破碎法は、ボーリング孔に上下2つが対になったパッカーを挿入し、パッカーの圧力を上げたのち、パッカー間に水圧を作用させ、ボーリング孔壁を破壊させる方法である。最近では、3次元応力状態を算出する方法も提案されている⁶⁾。しかし、これらの方法は技術的に非常に難しく、装置が大がかりとなり多大な費用を要する。

そこで、著者らはAEのカイザー効果を利用した地圧の推定法を確立するために第3～第5章までに一連の基礎的な問題点について考察してきた。

本章では、原位置から採取した岩石供試体を用い、試料採取後、応力解放に伴って回復するひずみがかいザー効果現象にどのような影響をもたらすのか、また上述した応力解放法とAE測定により求められる応力との間にどのような関係があるのかを明らかにした。

第2節 試料と実験方法

実験に使用した岩石試料は、阿木川ダムにおける土被り約80mの花崗岩地山の既設の空洞から直径75mm、掘削長さ11mの水平ボーリングを行い、岩石コアを採取した。岩

石採取地点は急傾斜をなす斜面の下部に位置し、付近の岩種は花崗岩が主体で、非常に堅固であった。図-6-1 に岩石コア採取地点および採取方向を示す。なお、既設の空洞壁面から 4m までの採取岩石コアには、発達した節理がみられるとともに、青灰色や緑灰色のシーム層が介在していたため AE 実験には使用しなかった。

岩石コア採取後、岩石の表面に 2 軸の抵抗線ひずみゲージを貼布し、恒温、恒湿な場所に放置し、ひずみの回復状態を調べた。その後、岩石コアの採取後の経過時間（例えば、コア採取後 1 日目、2 日目 ……）によって、採取された岩石コアから直径 30mm、高さ 60mm の円柱供試体に試料を整形した。試料整形方向は、図-6-2 に示すように、3 方向のもので、それぞれは、岩石コア採取軸方向（Ⅰ 方向）、軸方向から $1/4\pi$ rad の角度をなすもの（Ⅱ 方向）および軸方向と直角をなすもの（Ⅲ 方向）である。試料整形後すみやかに各供試体に 1 軸の抵抗線ひずみゲージを対角の位置に貼布し、一軸圧縮試験機を用いて、載荷速度 $100\text{kgf/cm}^2/\text{min}$ の単調載荷を行い、単調載荷試験時における応力とひずみおよび AE 累積数を測定した。

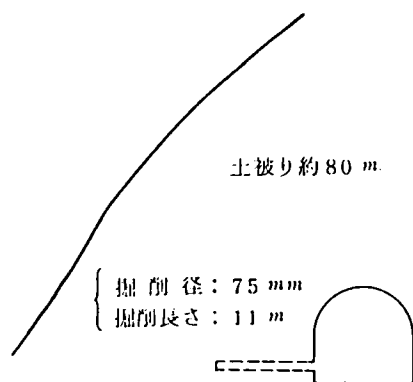


図-6-1 試料採取場所

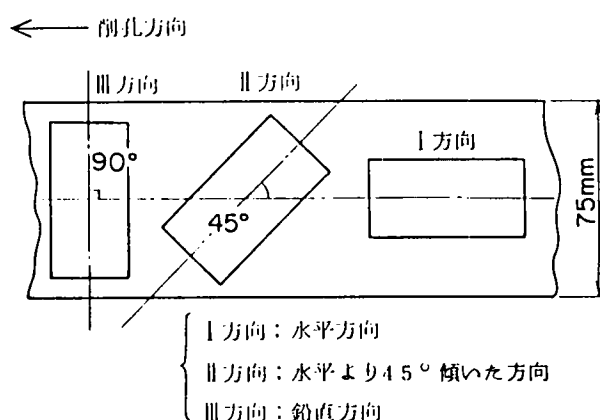


図-6-2 試料採取方向

第3節 試料採取後の解放期間とカイザー効果の関係

図-6-2 に示した Ⅰ 方向の円柱供試体を用い、試料採取後 1 日および 10 日経過した試料に対して、一軸圧縮試験を行い応力-軸ひずみ-AE 累積数の関係として表したもの

が図-6-3 (a)(b)である。図中、連続的なAEが発生し始める応力をカイザー効果とみなし、破線で示した。図-6-3(a)では、カイザー効果より初期応力として 10.4kgf/cm^2 、図-6-3(b)では、 5.7kgf/cm^2 と推定され、同一場所、同一方向の試料を使用したにもかかわらず、放置経過日数 1 日のものに比べ経過日数 10 日のものは約半分の値になっている。これらのデータを整理し、横軸に試料放置経過日数、縦軸にカイザー効果より推定される見掛けの応力をとれば図-6-4(a)(b)(c) となる。これらの図よりいずれの方向でも、岩石コア採取後 5 日目までは、カイザー効果より推定される応力はほぼ一定値を保っている。しかしながら、5 日目以降を境として経過日数に伴って小さくなり、経過日数が 10 日目を越すとほぼ一定値になる傾向がうかがわれる。これら図-6-4(a)(b)(c)の結果と第4章の第4節で行った室内での結果を合わせると図-6-5 となる。図より、室内試験の結果(●印)では、カイザー効果から推定される見掛けの軸応力と予め与えた軸応力とがほぼ同じである期間は 4 日目位までであった。一方、地山から試料採取後、放置期間が 5 日目までの試料では、ほぼ同じ値を示しており、図の傾向も室内試験の傾向と非常に良く似ている。このことは、試料採取時における試料の乱れとか応力の解放に伴いひずみの回復等が起こるが、もし地山内における地圧と試料採取直後における地圧とにあまり差がないとすれば、試料採取後の経過日数が 5 日目位までに試験をした場合、かなり正確な地圧を推定することができるのではないかと考えられる。

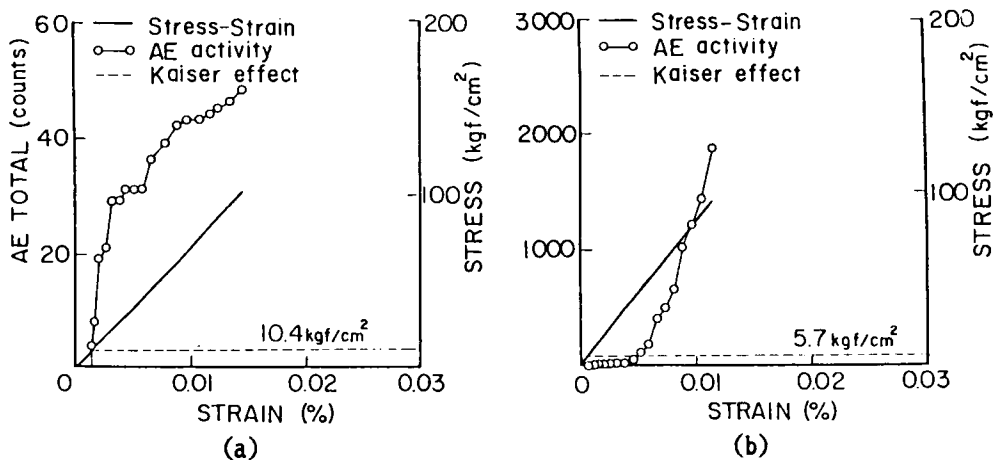


図-6-3 応力～軸ひずみ～AE累積数

(a) 試料採取後 1 日経過

(b) 試料採取後 10 日経過

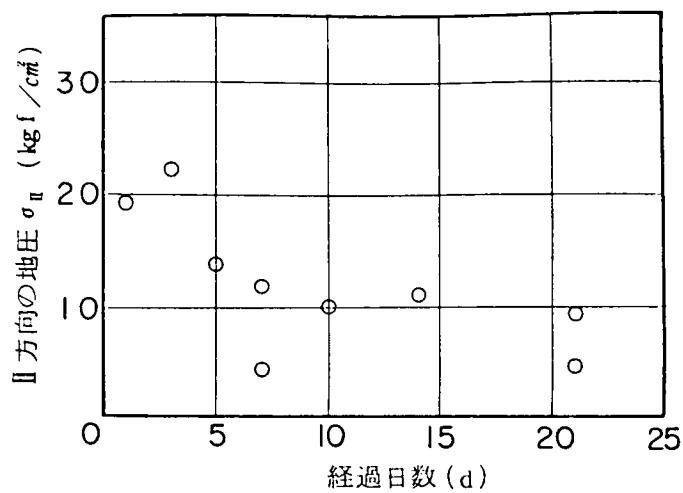
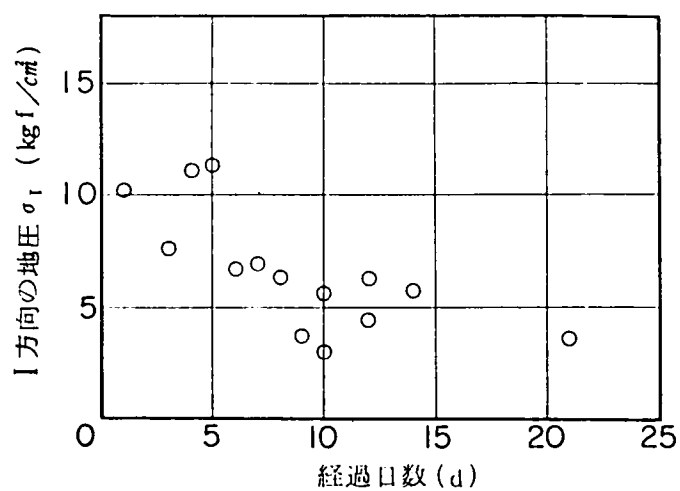


図-6-4 試料放置期間と推定応力の関係

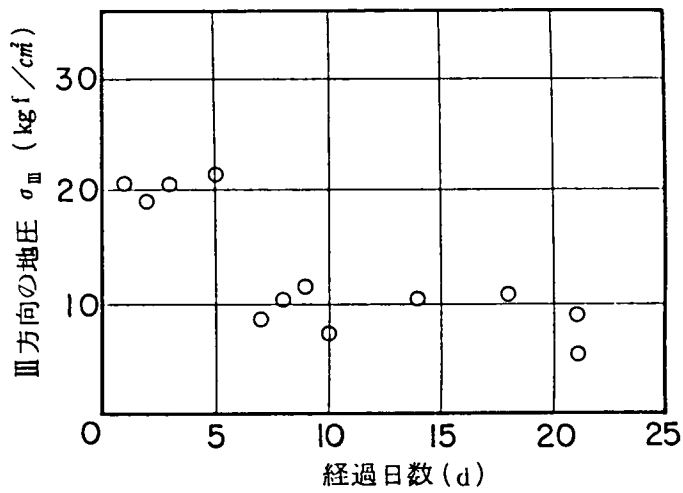


図-6-4 試料放置期間と推定応力の関係

(a) I 方向 (b) II 方向 (c) III 方向

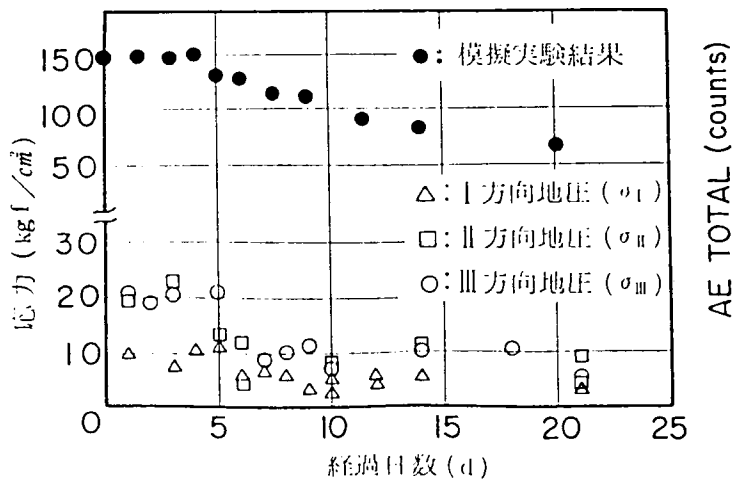


図-6-5 試料放置期間と推定応力の関係

第4節 AE法と他の方法との比較

第3章～5章および本章の前節までの結果では、大理石を除く種々な岩石（一部の試験は花崗岩のみ）において、岩石の異方性がカイザー効果に影響を及ぼさないことが明らかになった。このことをもとにすれば後述の式が得られ、その式を使い、地山における岩盤の最大主応力、最小主応力および主応力の傾斜角が求められる。ここでは、このようにして求めた値と応力解放法で求めた値とを比較検討したが、応力解放法によって地圧を求める場合多大な費用がかかるため、ここでは一例しか挙げられなかった。

a) 主応力と主応力の傾斜角の算出式

平面内のある一点におけるひずみを求める方法の一つに、直角ロゼット法と呼ばれるものがある¹⁾。この考えを利用して、平面内における主応力の大きさとその傾きを算出する。

ある平面内において、水平軸方向を基準にとり、鉛直軸方向へ 0° 、 45° 、 90° 傾いた三方向から求められる応力成分を σ

I、 σ II、 σ III とする。また、この平面内における最大主応力と最小主応力をそれぞれ σ_1 、 σ_2

とし、鉛直軸方向の応力成分 σ III から最大主応力 σ_1

へ傾く角度を θ とする。ただし、ここ

では圧縮応力を正、

そして最大主応力の傾き θ は鉛直軸方向の応力成分 σ III から反時計まわりを正とする。これらの関係をモールの応力円上に示すと図-6-6 のようになる。図より、三つの応力成分 σ I、 σ II、 σ III は最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_2 と主応力方向 θ を用いて以下の関係式で与えられる。

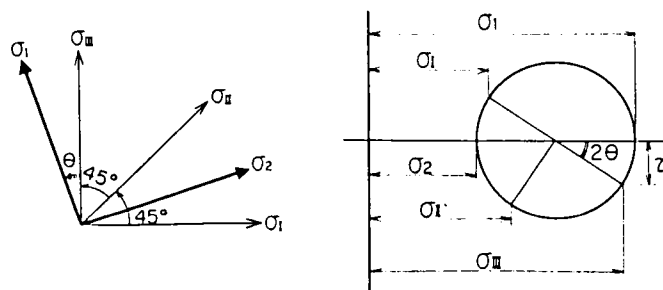


図-6-6 モールの応力円

$$\begin{aligned}\sigma I &= (\sigma_1 + \sigma_2) / 2 + (\sigma_1 - \sigma_2) / 2 \cdot \cos(\pi - 2\theta) \\ &= (\sigma_1 + \sigma_2) / 2 - (\sigma_1 - \sigma_2) / 2 \cdot \cos 2\theta \quad \text{-----(1)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma II &= (\sigma_1 + \sigma_2) / 2 + (\sigma_1 - \sigma_2) / 2 \cdot \cos(3/2 \cdot \pi - 2\theta) \\ &= (\sigma_1 + \sigma_2) / 2 + (\sigma_1 - \sigma_2) / 2 \cdot \sin 2\theta \quad \text{-----(2)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma III &= (\sigma_1 + \sigma_2) / 2 + (\sigma_1 - \sigma_2) / 2 \cdot \cos(-2\theta) \\ &= (\sigma_1 + \sigma_2) / 2 + (\sigma_1 - \sigma_2) / 2 \cdot \cos 2\theta \quad \text{-----(3)}\end{aligned}$$

また、図-6-6において、鉛直軸方向の応力成分 σIII に対するせん断応力成分を τIII とすれば、以下のようになる。

$$\begin{aligned}\tau III &= (\sigma_1 + \sigma_2) / 2 \cdot \sin(-2\theta) = -(\sigma_1 + \sigma_2) / 2 \cdot \sin 2\theta \\ &\quad \text{-----(4)}\end{aligned}$$

一方、最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_2 は、三つの応力成分 σI 、 σII 、 σIII とせん断応力成分 τIII を用いて以下の関係式で与えられる。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{array} \right\} = (\sigma I + \sigma III) / 2 \pm \sqrt{2} / 2 \cdot \sqrt{(\sigma III - \sigma I)^2 + \tau III^2} \quad \text{-----(5)}$$

ところで、式(4)のせん断応力成分 τ_{III} は、式(1)(2)(3)を用いて以下のように書き直すことができる。

$$\tau_{III} = \{ 2\sigma_{II} - (\sigma_I + \sigma_{III}) \} / 2 \quad \text{-----}(6)$$

したがって、式(6)を式(5)に代入すると、最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_2 は以下の関係式となる。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{array} \right\} = (\sigma_I + \sigma_{III}) / 2 \pm \sqrt{2} / 2 \sqrt{(\sigma_I - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2} \quad \text{----}(7)$$

そして、最大主応力 σ_1 の傾き θ も式(1)(2)(3)より次のようになる。

$$\tan 2\theta = \{ 2\sigma_{II} - (\sigma_I + \sigma_{III}) \} / (\sigma_I - \sigma_{III}) \quad \text{----}(8)$$

b) 計算例

第2節で述べた試料を用いて、試料採取後 4 日以内に岩石を整形し、一軸圧縮試験を行い、同時にAEを測定し図-6-2 の I、II、III 方向における先行軸応力を求めた結果、表-6-1 のようになった。

一方、同一地点において応力解放法より推定した地圧成分は $\sigma_1 = 28.5 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\sigma_2 = 8.0 \text{ kgf/cm}^2$ および $\theta = -1.5$ であった。

データ数が非常に少ないため、ここでは考察することはできないが、例として挙げた結果をみれば、応力解放法に比較してAE法では若干小さな値になっていることがわかる。今後、多くのデータを収集し考察したいと考えている。

表-6-1 カイザー効果より推定された最大主応力
最小主応力および傾き

データ		計算結果		
	各方向の推定応力 (kgf/cm ²)	最大主応力 (kgf/cm ²)	最小主応力 (kgf/cm ²)	傾き (rad)
Case 1	$\sigma I = 10.40$ $\sigma II = 19.60$ $\sigma III = 21.00$	23.32	8.32	-0.32
Case 2	$\sigma I = 7.75$ $\sigma II = 22.6$ $\sigma III = 19.4$	24.31	2.83	-1.55
Case 3	$\sigma I = 11.8$ $\sigma II = 22.6$ $\sigma III = 20.8$	22.81	9.81	-1.41

第5節 結論

カイザー効果現象を利用し、岩盤の受けていた地圧を推定する際に問題点の一つと考えられる、地山から試料採取後の経過時間とカイザー効果の関係を解明するため、阿木川ダムの花崗岩試料を用いて実験を行った。得られた結果をまとめると以下のようになる。

地山から採取した岩石試料を恒温、恒湿な場所で種々の期間放置した後、一軸圧縮試験によりAEを測定し、見掛けの先行軸応力を求めた結果、岩石採取後 5 日目位を境にして、見掛けの先行軸応力は急激に小さくなる傾向がうかがわれる。また岩石採取後 10 日目以降（今回の実験では 20 数日まで）では、カイザー効果より推定される応力はほぼ一定値におちつく傾向が認められた。このことは第4章の第3節における、一定クリープ荷重除荷後 4 日目以内であれば、予め与えた応力に等しい応力がみい出せるが、それ以降は除々に小さくなることと良い対応を示している。いずれにしても、カイザー効果を利用して、岩石の地圧をもとめる場合、岩石採取後はできるだけ早い時期に試験を行う必要があることがわかる。

原位置から試料採取後 4 日以内の試料においてAE試験を実施し、応力解放法とAE法で求められる最大主応力、最小主応力および主応力方向の傾きを比較した結果、AE法における値は応力解放法に比較して若干小さな値を呈したが、今後種々な問題点を解決することにより、AE法による地圧の推定が有効な手段になりうると考えている。

参考文献

- 1) Merrill, R.H. and Peterson, J.R. : Deformation of Borehole in Rock, U.S.B. Mines R.I.5881, 1961.
- 2) Leeman, E.R. : The Doorstopper and Triaxial Rock Stress Measuring Instrument Developed by the CSIR., Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol.69, pp.305-339, 1969.
- 3) 川本眈万 : 岩盤力学、朝倉書店、pp.57-60, 1973.
- 4) Bernede, J. : New Developments in the Flat Jack Test, Proc.3rd.Cong.ISRM, Vol.2A, pp.433-438, 1974.
- 5) Fairhurst, C. : Measurement of In-Site Stresses with Particular Reference to Hydraulic Fracturing, Rock Mech. and Eng.Geol. Vol. II, pp.129-147, 1965.
- 6) Mizuta, Y. et al. : A Procedure for Three Dimensional Stress Determination by Hydraulic Fracturing, Proc.of the 15th Symp.on Rock Mech., JSCE, pp.116-124, 1983.
- 7) 川本眈万 : 応用弾性学、共立出版社、pp.33-36, 1977.

第7章 AEによる粘性土の 先行圧縮応力の推定

第1節 序論

地盤沈下量を的確に推定するためには、粘性土の先行荷重 p_c を知る必要があり、一般には圧密試験結果に基づいて Casagrande 法が用いられている。しかしこの方法にはいくつかの問題点があり、例えば $e - \log p$ 曲線の間隙比スケールの取り方によって p_c の値が変動するので、一意的な決定法でないと指摘されている¹⁾。

図-7-1 は大阪湾泉南沖水深約 20m 地点における海底粘土層の p_c 特性を示している²⁾。この p_c 値は、上述の方法で求められたものであるが、図より明らかなように、Ma12

以深の洪積粘土層では、 p_c の値が非常にばらついている。その原因が、粘土の本来的な性質によるのか、あるいはサンプリング時の攪乱などの外的要因に起因するかは不明であるが、以下に述べるように Casagrande 法（圧密試験）以外の方法で p_c 値を求め、比較検討してみるのも意義あることと考える。

る。

ここでは、AE(Acoustic Emission)におけるカイザー効果と呼ばれる非可逆的現象を利用して粘性土への適用を試みた。

AEによる土質材料への応用例として砂質土に関しては、粒子の挙動とAE発生割合との相関性を求めたものがあり³⁾⁴⁾⁵⁾、また岩石では破壊にともなう Source Location の問題、あるいは、地山における岩石の有する地圧の推定などが報告されている⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾。しかしながら、粘性土におけるこの種の研究は^{2,3)10)11)}を除いてあまり見受けられない。

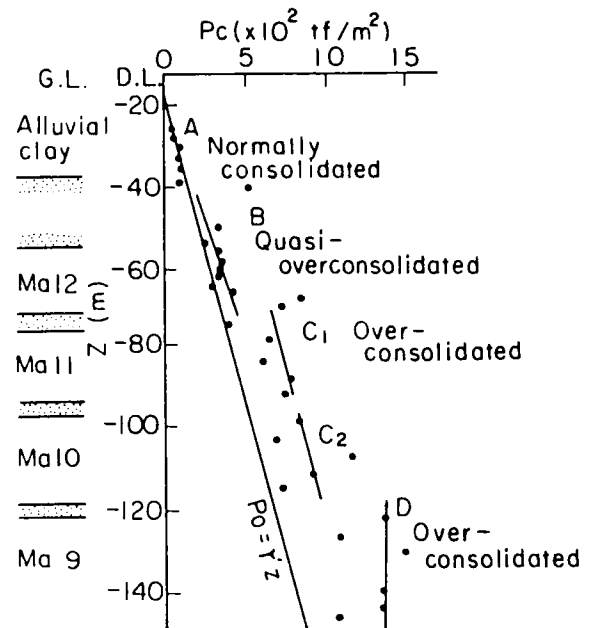


図-7-1 大阪湾泉南沖の海底粘土の
先行圧縮応力 p_c 特性
(赤井、佐野より)

本章では、市販粉末粘土および乱さない洪積粘土を用いて、排水等方三軸圧縮試験中に発生するAEを観測することにより、粘性土におけるカイザー効果の確認ならびに洪積粘土の p_c を推定し、圧密試験により求めた先行圧縮応力 $p_c \cdot \text{con}$ との比較を行い、その有効性を述べるものである。

第2節 実験

2-1 試料および実験装置

(1) 試料

実験に用いた試料は、市販の粉末乾燥粘土（通称『藤の森粘土』）をフルイにかけ高含水比で練り返した後、大型圧密リングを用いて圧力 2kgf/cm^2 で予圧密したものと、兵庫県尼崎市の埋め立て地よりデニソンサンプラーで採取した不攪乱海底粘土である。使用した試料の粒径加積曲線を図-7-2、物理特性を表-7-1、海底粘土の採取地点における土質構成を図-7-3 にそれぞれ示す。

表-7-1 物理特性

Gs	P.L.	L.L	P.I.
2.65	29.3	53.5	24.2

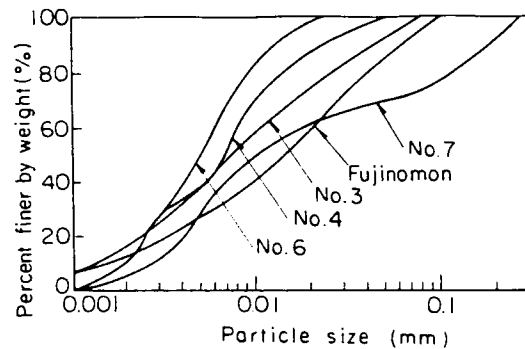


図-7-2 粒径加積曲線

(2) 実験装置

今回使用した実験装置は、三軸圧縮試験機とAE観測（第2章で説明）とで構成されている。三軸圧縮試験機は GEONOR 社製のN.G.I.

タイプのものを用い、図-7-4 に示すように上部にAEトランスデューサを設置し、供試体下部に排水経路を設け間隙水压を測定した。

2-2 実験方法

実験は直径 35mm , 高さ 80mm の円柱供試体を使用し、排水等方三軸圧縮試験を間隙水圧の消散が十分認められる載荷速度 0.1kgf/cm²/min の応力制御方式で行った。

AEの計数測定は、粘性土におけるAE信号が非常に小さいため、第2章の図-2-5で述べたリングダウン計数法を用いた。

第3節 実験結果と考察

3-1 粘性土におけるカイザー効果の確認

Koerner, et al.³⁾¹⁰⁾ は原位置におけるボーリング孔内載荷試験への応用を目指した研究の一部として、AEによるカイザー効

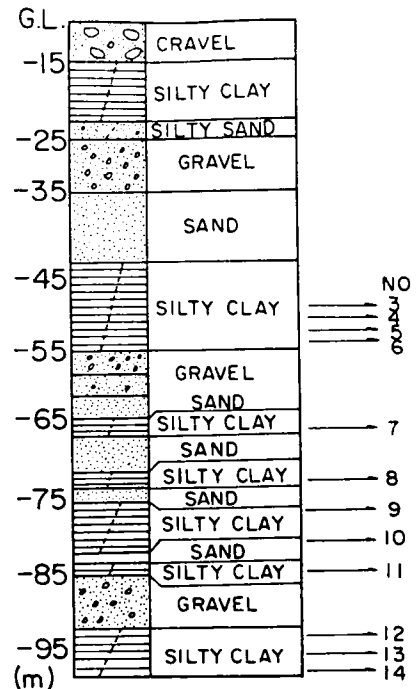


図-7-3 尼崎洪積粘土の土質柱状図

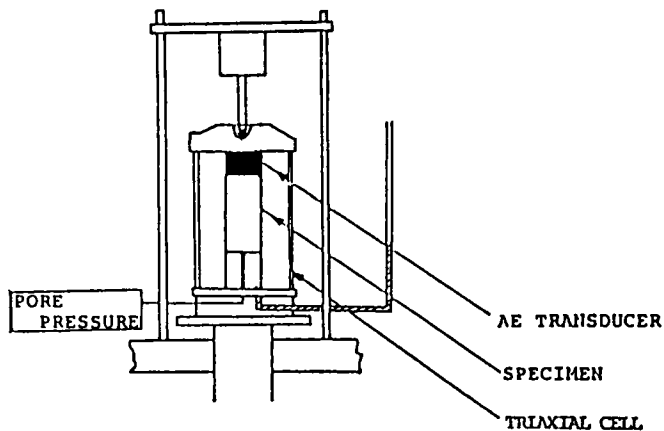


図-7-4 三軸圧縮試験機

果を利用して砂質土および粘性土の先行圧縮応力 p_c の推定を試みている。そこでは、予め圧密試験機で圧密した 5 種類の砂質土と 6 種類の粘性土を用いて種々の含水比のもとで圧密試験中に発生する AE を観測し AE 発生率と変形量および圧力の関係を求めている。図-7-5 にその一例を示す。その結果、当初与えた先行荷重は、AE におけるカイザー効果より誤差 10 % 以内で推定できている。

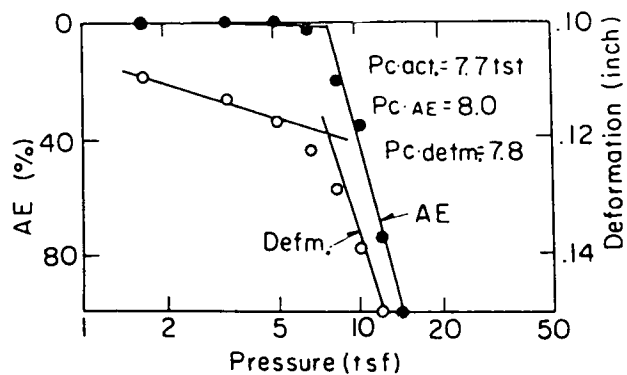


図-7-5 応力～変形量～AE関係
(from Koerner et al.)

本章では、粘性土におけるカイザー効果の確認のために、圧密圧力 2kgf/cm^2 を受けた『藤の森粘土』を用いて、排水等方三軸試験を行った。図-7-6(a)(b)(c) に結果の一例を示す。図の縦軸はAEカウントレートを、横軸は排水等方圧縮における拘束圧 p をとっている。いずれの図においてもAEの発生状況は、ある拘束圧から連続的に発生しているので、ここでは連続的に発生し始める最初の拘束圧をAEによる先行圧縮応力 $p_c \cdot AE$ と定義する。この定義によれば、図-7-6では $p_c \cdot AE$ がそれぞれ 1.84、1.94 および 1.96kgf/cm^2 となり、予圧密により与えた先行荷重が 2kgf/cm^2 であることを考えれば、Koerner, et al. の結果と同様に、排水等方三軸試験での粘性土においてもカイザー効果が認められ、カイザー効果より得られる値は予め与えた軸応力にほぼ対応していることがわかる。

3-2 洪積粘土における $p_c \cdot AE$ の推定

3-1において、粘性土のカイザー効果の存在を明らかにした。この現象を利用し、乱さない洪積粘土を用いて、排水等方三軸試験中に発生するAEを観測することにより $p_c \cdot AE$ を求めたのが図-7-7(a)(b)(c)(d) である。上述した $p_c \cdot AE$ の定義に従えば、図-7-7(a)(b)(c)の各試料では p が小さい値でも若干AEは発生しているが、連続的という意味で、 $p_c \cdot AE$ はそれぞれ 5.52、5.20、および 6.20kgf/cm^2 と判定される。しかし(d)の試料では、 $p_c \cdot AE$ は認められなかった。その理由は、試験機の容量(最大拘束圧 = 7.

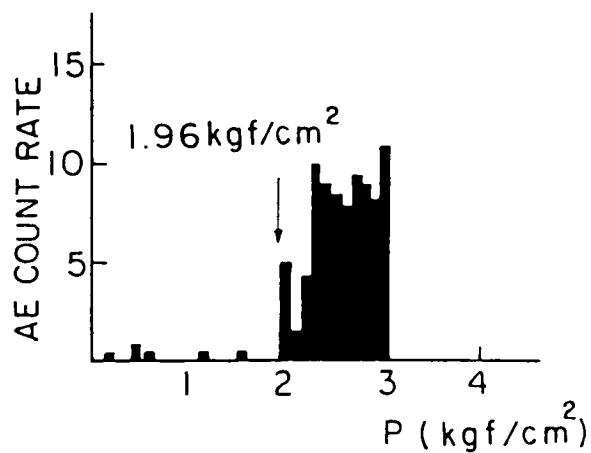
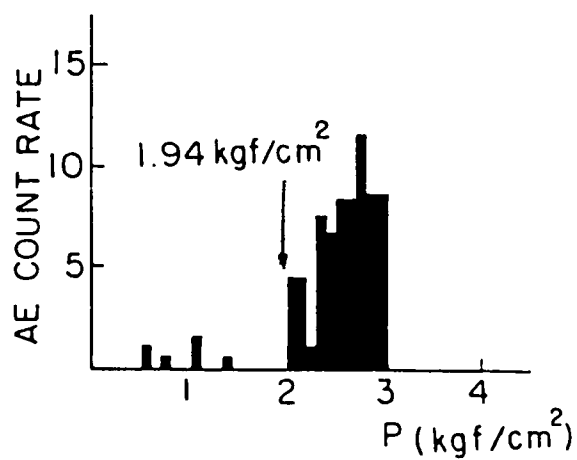
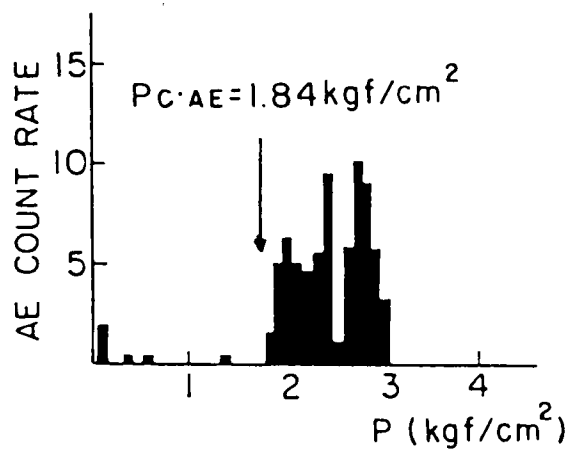


図-7-6 PC・AE と 拘束圧の関係

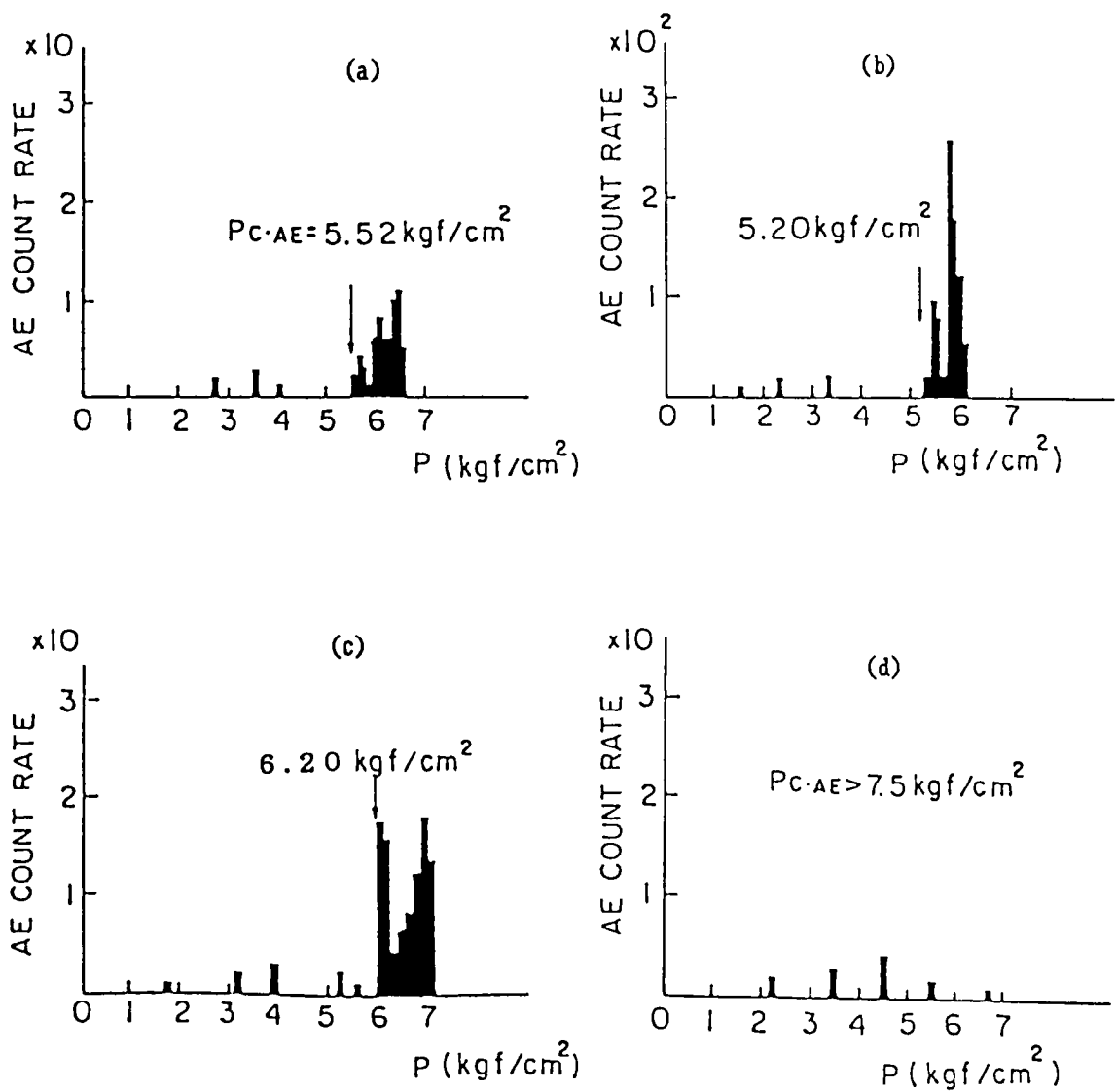


図-7-7 尼崎洪積粘土の $PC \cdot AE$ と拘束圧の関係

5kgf/cm²) がこの試料の $p = 10.2\text{kgf/cm}^2$ を下回っていたためと考えられる。

これらAEにより求めた洪積粘土の $p_c \cdot A_e$ と、同一地点で採取した試料の圧密試験による先行圧縮応力 $p_c \cdot \text{con}$ との比較を図-7-8に示す。この図において、試料No.7のデータで両方法による値に大きなひらきが生じた原因として次のように考えた。

(1) AEによる $p_c \cdot A_e$ が小さめに計測された可能性について――

図-7-8におけるNo.7以外では、砂質分は約1%であるのに対して、No.7の試料では砂含有率が約30%であった。粘性土において砂質分が多いほどAE発生割合も増加することは著者ら¹²⁾および谷本他¹³⁾によって報告されているが、この傾向は図-7-7の(a)(c)と(b)において、縦軸のオーダを比較した場合、砂質分の多いNo.7(図-7-7の(b))の試料ではAE発生割合が極めて顕著に増加していることからわかる。このような特徴をベースにして考えると、砂質分の多い洪積粘土では試料が過圧密から正規圧密状態へと徐々に移行する載荷段階において、粒子に微小な動きがあっても、それが直ちにAE発生割合に反映し、本来試料の有している p_c よりも小さな値を計測している可能性がある。

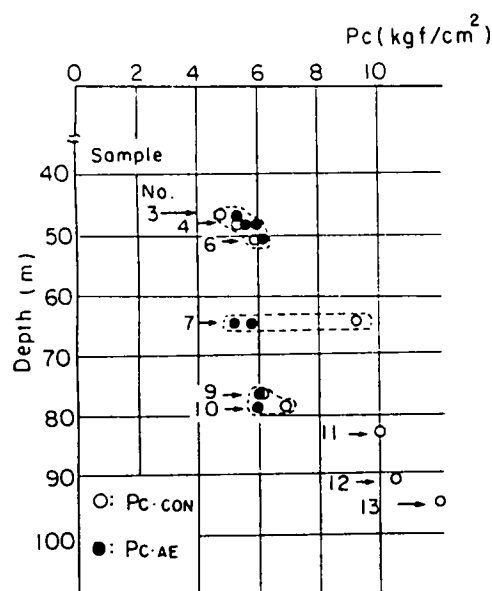


図-7-8 $p_c \cdot \text{con}$ と $p_c \cdot A_e$ との比較

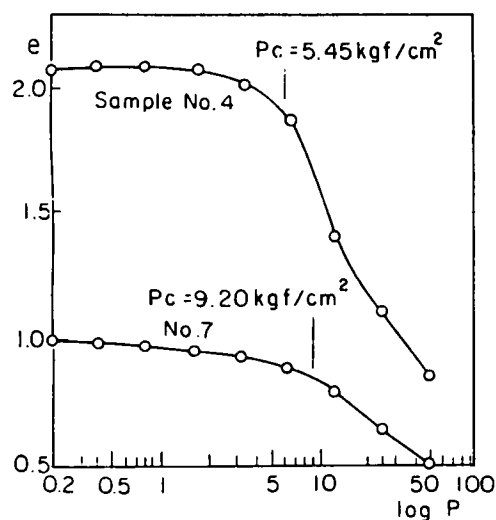


図-7-9 尼崎洪積粘土の $e - \log p$ 曲線

(2) 圧密試験による $p_c \cdot AE$ が大き目に出た可能性について――

図-7-9は、砂質分の多い土 (No.7) と少ない土 (No.4) に対して、それぞれの $e - \log p$ 曲線を描いたものである。No.4 試料では、曲線の曲率が大きい典型的な粘土の特性を示しており、 $p_c \cdot con$ の推定は比較的容易である。これに対して No.7 試料では、曲線の曲率が小さいため $p_c \cdot con$ の推定にある程度の幅を生じざるを得ない。

以上に述べた原因により、両方法における p_c 値に大きな開きが生じたと推定されるが、砂質分を多く含んだ土の p_c 値決定法については、まだ結論を出すまでに至っていない。

次に、各試料の有する先行圧縮応力以上の荷重を与えた後、除荷→再載荷を行うことにより、当初洪積粘土が有していた p_c にどのような変化が生じるかを調べた。図-7-10はそれらの結果である。図中 $p_c \cdot AE_1$ (図(a)) は処女載荷によって、拘束圧力をそれぞれ 7.0, 7.0 および 7.0 kgf/cm^2 まで上げた時に、AEにより得られた先行圧縮応力を意味している。また $p_c \cdot AE_2$ (図(b)) は、上記の拘束圧力を除荷した後、それぞれの試料に 7.5 kgf/cm^2 まで再載荷した場合のAEによる先行圧縮応力を示している。この図より、再載荷によって得られた $p_c \cdot AE_2$ は処女載荷時に与えた最大の拘束圧にほぼ等しくなっていることがわかる。

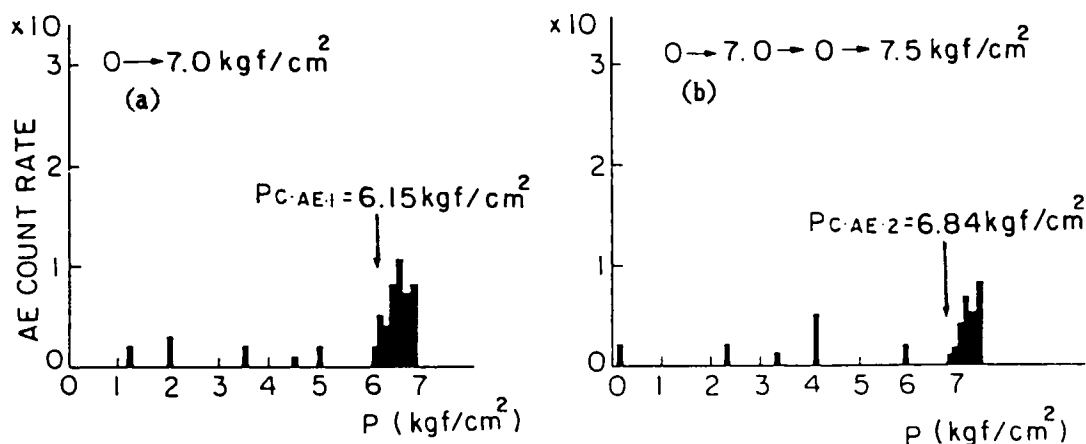


図-7-10 (a) $p_c \cdot AE$ と拘束圧の関係

(b) 再載荷による $p_c \cdot AE$ の変化

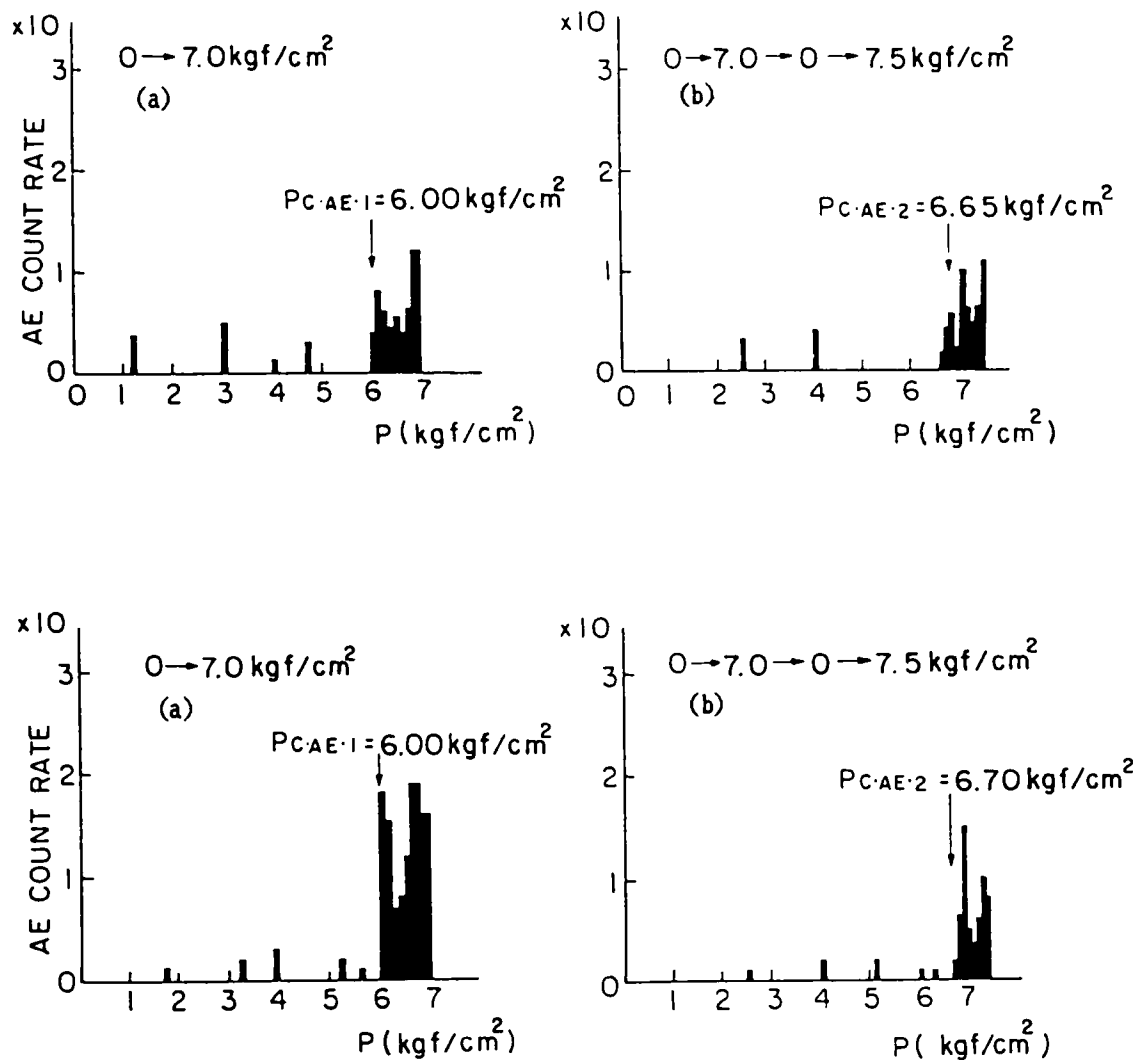


図-7-10 (a) $P_C \cdot AE$ と拘束圧の関係

(b) 再載荷による $P_C \cdot AE$ の変化

第4節 結論

本研究は、粘性土における先行圧縮応力をAEにおけるカイザー効果を利用して求めたものであり、その結果を要約すると以下ようになる。

- 1) 金属や岩石などにみられるカイザー効果は粘性土においても同様に認められ、AE

測定から得た p_c 値は、過去に受けた軸方向の最大応力にほぼ等しい。

- 2) 排水等方三軸圧縮中に発生するAEを観測することにより、洪積粘土の先行圧縮応力は圧密試験による $p_c \cdot con$ とほぼ同程度の精度で求められる。

上記 2) の結論の例外として、砂質分の多い洪積粘土では $p_c \cdot con$ と $p_c \cdot AE$ とのあいだに大きな開きがあったが、まだ結論を出すまでに至っていない。

本章では、主に粘性土におけるカイザー効果の存在の確認と、カイザー効果を利用したAEによる $p_c \cdot AE$ と圧密試験による $p_c \cdot con$ との比較検討を行った。しかし、排水等方圧縮と K_0 - 圧密とでは、厳密に言えば、載荷応力状態が違うという問題を残している。今後こういった点を考慮しながら、さらに実験を進めたいと考えている。

参考文献

- 1) 三笠正人：圧密試験の整理方法について、土木学会第19回年次学術講演会講演概要集、1964.
- 2) 赤井浩一・佐野郁雄：遅延圧密土の一次元変形挙動、京都大学防災研究所年報、第24号 B-2, pp.73-82, 1981.
- 3) Koerner, et al. : Acoustic Emission Behavior of Granular Soils, Proc. ASCE Vol.103, No. GT8, pp.837-850.
- 4) Tanimoto, K. et al. : A Study of Shear Deformation Sandy Soils of Prestress by the Acoustic Emission Response, Proc. Second Int. Con. on Microzonation, pp.971-982, 1978.
- 5) 村山朔郎・道広一利：AEからみた砂の粒子挙動、土木学会論文集、第352号、pp.119-127, 1984.
- 6) 柳谷 俊 他：岩石のクリープ時に発生するAEの震源決定について、材料、第33巻、第366号、pp.272-278, 1984.
- 7) 柳谷 俊 ：表面ひずみのマッピングによる岩石のクリープの研究、材料、第33巻第366号、pp.272-278, 1984.
- 8) 金川 忠 他：岩石における地圧成分の Acoustic Emission による試み、土木学会論文報告集、第258号、pp.63-75, 1977.
- 9) Murayama, S. et al. : The Kaiser Effect of a Granite under Various Loadings, Progress in Acoustic Emission , pp.586-593, 1984.
- 10) Koerner, et al. : Determination of Prestress in Cohesive Soils Using AE , Proc. ASCE, Vol.110, No. GT11, pp.1573-1548, 1984.
- 11) 道広一利・柴田 徹：AEによる洪積粘土の先行圧縮応力の推定、第20回土質工学研究発表会講演概要集、1985.
- 12) 道広一利 他：混合土のAE特性、昭和58年度関西支部年次学術講演概要集、1983.
- 13) 谷本喜一 他：AE計測を併用したコーン貫入試験、土木学会第37回年次学術講演会講演概要集、pp.629-630, 1982.

第 8 章 粒状体の粒子挙動と A E の関係

第 1 節 序論

地盤や土構造物の沈下、変形に関する問題の解明には、土の応力－ひずみ関係を明らかにすることが必要である。この関係は、土の微視的な粒子挙動によって支配される土の外作用とその応答関係といえよう。この点に立脚して、村山は微視的な立場から砂の構成式¹⁾²⁾³⁾を理論的に導いた。そのような微視的な方法による構成式の誘導過程を採る場合には、過程の妥当性を立証するために微視的な現象が照査できる実験方法の開発が要望される。そこで粒子挙動の観測手段の一つとして、砂粒子の移動によって発生する微震音響パルス (AE) を利用することの意義とその有効性が指摘³⁾されているが、本章ではそのような立場で砂の粒子構造を AE を介して実験を行い、その結果について述べる。

AE は従来、主として金属分野において、材料の疲労、亀裂および破壊の予知などに幅広く利用されてきたが、近年、金属以外の材料としてコンクリート、岩盤などについても AE 特性が解明されている⁴⁾⁵⁾。また、土の分野においても、土の破壊予知に関連した研究⁶⁾⁷⁾などがみられるが、まだ他の分野に比較して研究例はそれほど多くない。

本章では、砂をせん断するときの砂の応力－ひずみ関係を観測すると同時に AE を検出し、砂の構成式¹⁾²⁾³⁾と対比して両者の関係を解析して、(1) 砂の基本状態には弾性、弾塑性および破壊の 3 状態が存在すること、(2) 砂のカイザー効果の特性ならびに載荷方向の異方性が粒子構造やカイザー効果に及ぼす影響などを検討した。

第 2 節 試料、実験装置および実験方法

実験に使用した砂試料は、豊浦標準砂をふるい分けして 0.42mm ふるいを通過し、0.10mm に残留したもので、その粒径加積曲線を図－8-1 に、また、試料砂の諸物性を表－8-1 に示す。

実験装置の構成を大別すると、一面せん断試験装置と AE 観測装置 (第 2 章で説明) とからなる。ここで用いた一面せん断試験機は在来型の下部可動式試験機のせん断箱を図－8-2 に示すように内のり縦・横それぞれ 211.8mm、高さ 80.0mm の正方形の二段の箱に改造したうえ、さらに垂直荷重を載荷したまま、せん断箱を 90° 水平に回転できるように

表-8-1 豊浦砂の物性

G_s	D_{10}	C_u
2.64	0.23	1.40

して、同一砂試料を X, Y 各方向 (X : 砂が最初にせん断される方向、Y : 水平面上で直交する方向) でせん断することを可能にしたものである。せん断箱を動かすモーターはシンクロモーターで、それに無断変速機を直結してせん断速度が調節できるようにした。変位の測定には 1 / 100mm の精度のダイヤルゲージを、垂直荷重およびせん断力の測定には、それぞれのロードセルを使用した。せん断変位とせん断力の測定はダイヤルゲージとロードセルの出力を x - y レコーダに接続して変位-せん断力曲線を描かして、この曲線から測定することとした。

せん断試験は、次の二方式の実験を行った。実験-I ; ゆる詰め砂試料に一定垂直応力のもとで一定応力振幅 τ_{ap} の片振幅繰り返しせん断を与えて残留変位の増加がほとんど認められなくなったあと供試体をせん断破壊させる方式。実験-II ; まず実験 I と同様に、X 方向で残留変位の増加がなくなるまで十分繰り返しせん断を与えたのち、当初の垂直荷重を変化させずに

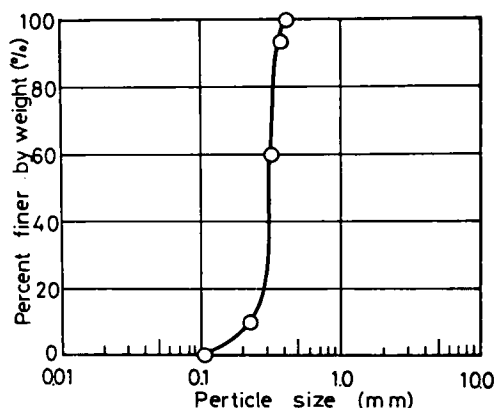


図-8-1 粒径加積曲線

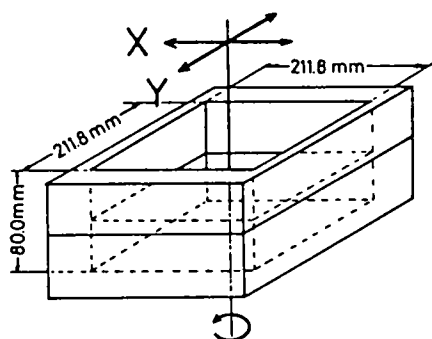


図-8-2 改良型せん断箱

Y 方向へせん断箱を回転させて同様の繰り返しせん断を行い、以後同じ操作を X, Y 各方向の残留変位の増加が止るまで繰り返したのち供試体をせん断破壊させる方式との 2 つの方式。

なお、繰り返しせん断応力振幅の波形は図-8-3 に示すような三角波形を与えたが、その周期は繰り返し回数の増加とともに短くなった。図中縦軸はせん断応力の片振幅を横軸は時間を表している。なおここで用いたせん断速度は繰り返しせん断のときも、せん断破壊の実験のときもともに一定の $1\text{mm} / \text{min}$ とした。

第3節 砂の各状態の定義¹⁾²⁾³⁾

(1) 砂の弾性状態

一般に弾性状態とは、載荷した応力を除荷したとき、ひずみが載荷時と同じ経路で瞬時に回復し残留ひずみが生じない状態と定義されているが、今回実験に用いたような砂の場合では、一定垂直応力 σ_n のもとで一定せん断応力 τ_{ap} を片振りで載荷と除荷を繰り返し、除荷時に残留変位の増加が認められなくなった状態を弾性状態と定義している。また、この砂のもつ弾性限界値をせん断／垂直応力比 S_{el} で表せば $S_{el} = \tau_{ap} / \sigma_n$ となる。

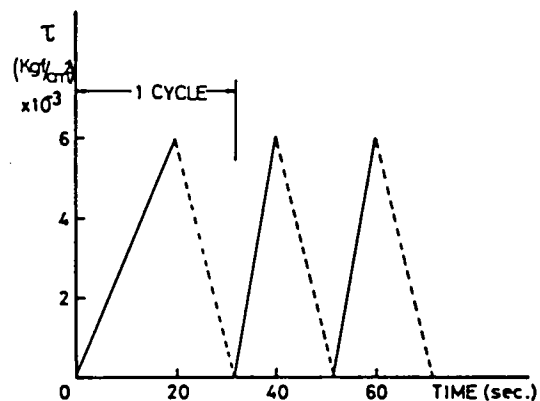


図-8-3 応力振幅の波形

弾性状態を砂粒子の微視的挙動からみれば、応力の載荷と除荷に応じて相対的に滑動した粒子が初期の位置と構造障壁との間を往復するとき現われる状態と考えられている。¹⁾ 砂試料が繰り返しせん断によって弾塑性状態から弾性状態に移行するまでの残留変位の増加過程を表わす関係は次式のように導かれている。

$$n / \delta_n = a + b \cdot n \quad (a, b : \text{定数}) \text{-----} (1)$$

ここに、 n は片振幅繰り返しせん断の回数、 δ_n は 1 回目の載荷時より n 回目の除荷時

に至るまでの総残留ひずみ、いま、 $n \rightarrow \infty$ のときの δ_n を δ_∞ と記せば、 δ_∞ は式(1)より

$$\delta_\infty = 1 / b \quad \text{-----}(2)$$

となる。

(2) 砂の弾塑性状態

一定垂直応力 σ_n のもとで弾性状態にした砂にせん断応力 τ を加える場合を考えよう。このとき加えた応力比 z ($z = \tau / \sigma_n$) が弾性限界応力比 S_{el} 以上で破壊応力比以下の場合には、そのとき生じたせん断ひずみは、せん断応力を除荷しても完全には元のひずみに戻らない。この応力下の砂の状態を砂の弾塑性状態と定義する。この状態においては、砂粒子はせん断応力の載荷によって構造障壁をこえて、次の安定位置へ転移 (dislocate) し、そこで弾性時の粒子状態となって、せん断応力を除荷しても当初の位置へ戻らないためと考えられている。

弾塑性状態に対して誘導された載荷応力比 z と弾塑性せん断ひずみ γ_p との関係式は次式で示される。

$$\gamma_p = A_e \cdot W_e \cdot \chi \cdot (S_\infty - S_{el}) (z - S_{el}) / (S_\infty - z) \text{-----}(3)$$

ここに、 γ_p は、砂が弾性状態から弾塑性状態に移行したあとに生じる最大せん断ひずみ、 A_e 、 W_e はそれぞれ砂が弾性状態にあるときの粒子の変位係数と構造係数、 χ は弾塑性時の粒子の移動距離と弾性時のそれとの関係を表す係数、 S_∞ は、砂が弾塑性状態を継続しつづけたと仮定したとき、すべての粒子が滑動するのに要する z の値である。 A_e 、 W_e 、 χ および S_∞ の各値は砂が同一であれば一定であるから

$$A_e \cdot W_e \cdot \chi \cdot (S_\infty - S_{el}) = B, \quad \text{-----}(4)$$

と置くことができる。また、一定垂直応力 σ_n のもとでの一面せん断試験では、式(3)において γ_p を弾塑性状態におけるせん断変位 δ_p ($= \delta - \delta_{el}$) に、応力比 z 、 S_{el} 、 S_∞ をそれぞれ、せん断応力 τ 、 τ_{el} 、 τ_∞ に置き換えると式(3)は次式になる (δ_{el}

: 弾性限界ひずみ)。

$$(\tau - \tau_{el}) / \delta_p = (\tau_{\infty} - \tau) / B \quad \text{-----}(5)$$

式(5)は $(\tau - \tau_{el}) / \delta_p \sim \tau$ 関係が負の傾きをもつ直線で表されることを示している。

(3) 破壊状態

砂に破壊応力比以上のせん断応力比 (σ_n は一定) を加えれば、その応力のもとでは、砂のひずみは際限なく増加しようとする状態となる。この状態を砂の破壊状態という。破壊状態においては、粒子間力によって移動する粒子はそれに作用している粒子間力が大きいために移動後安定が得られず、そのため残りの粒子も次々と移動に移る。ゆえに破壊状態は、すべての粒子がとめどもなく移動をつずける状態と考えている。

第4節 実験結果と考察

4-1 砂のせん断中におけるAE特性

a) 繰返しせん断時の応力-変位関係

一定垂直応力のもとで砂(試料 A) に一定せん断応力片振幅を繰返し与えると図-8-4のように繰返しせん

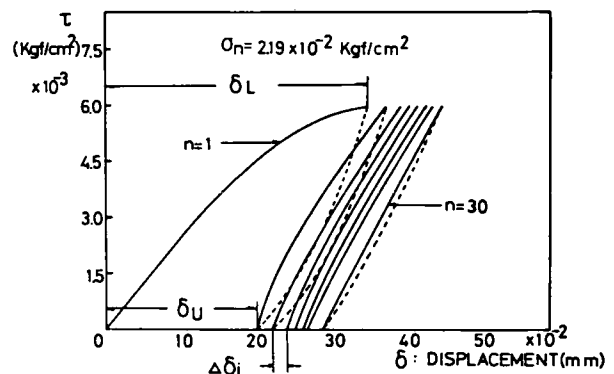


図-8-4 繰返しによる応力～変位関係

断時の応力-変位関係曲線は、繰返し回数の増加とともに徐々に残留変位の増加率が減少し、最終的にはある傾きをもつヒステリシスループ上を移動するようになる。初期間隙比をほぼ等しくした A, B, C の三試料 (試料 A: 初期間隙比 = 0.745, 試料 B: 0.742, 試料 C: 0.740) について同様のせん断試験を行い、繰返しせん断中の繰返し回数 n と n 回目の載荷時の総変位 δ_L および、それを除荷したときの総残留変位 δ_u との関係を求めると図-8-5 となる。それぞれの試料において、この両曲線は繰返し回数の増加とともにほぼ等間隔を保ちつつ増加し、最終的にはおのおの一定変位を示し

横軸と平行になる。 $n \sim \delta_u, \delta_L$ 関係において、せん断最終時の二曲線間の距離が等しいことから、最終的な応力-変位曲線のヒステリシスループの傾きは同一試料砂において等しいことがわかる。一方、このデータを式(1)の繰り返し回数と残留変位の関係として表したのが図-8-6である。同一試料、同一試験による試料 A, B, C それぞれの関係も直線関係を示しており、この実験結果からも、式(1)の妥当性が検証されたといえる。したがって、繰返し回数を無限大にしても残留変位は有限な一定の値をとることとなる。この最終状態は第3節で定義した弾性状態であり、このように砂は一定のせん断/垂直応力比の繰返しし載荷を加えることによって弾性状態となる。

b) 弾性状態以後の応力-変位関係

一定の垂直応力 σ_n のもとで繰返しせん断応力 τ_{op} を加えて弾性状態にした砂（この砂の弾性限界は τ_{op} となる）を元の垂直応力を一定に保ったまません断応力を増加していけば、砂は τ が τ_{op} 以上になると弾塑性状態となりさらに増加すれば最終的には試料は破壊する。ここでは、 τ_{op} 以上のせん断応力 τ を受けた場合の応力-変位の関係について検討する。弾塑性状態の構成式

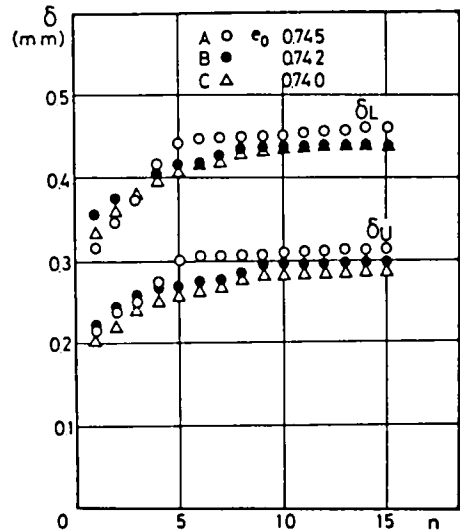


図-8-5 残留変位と繰返し回数の関係

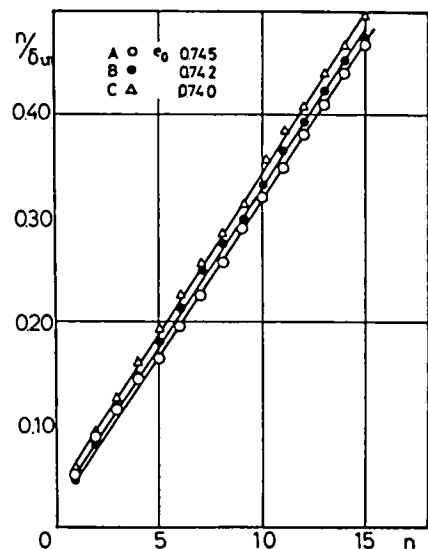


図-8-6 $n / \delta_u \sim n$ 関係

としては式(5)がある。式(5)に沿ってデータを整理すれば図-8-7 となり、理論式で示したように負の傾きで示される図において横軸の τ の小さいところでは若干ばらつきが見受けられるが、これは弾性状態から弾塑性状態への移行過程の部分と考えられる。

c) 砂におけるカイザー効果

例えば金属材料に応力を増加していくと、応力の値が過去にその材料が受けた最大応力値を越えるまではAE信号の発生はほとんど検知できない。この現象をカイザー効果という。金川ら⁴⁾は岩石に一軸圧縮試験機を用いて与えた先行荷重に対してカイザー効果により求めた推定先行荷重の誤差は、ほぼ 15 % 以内であったと報告をしている。また、丹羽ら⁸⁾によって鉄筋コンクリートを用いた場合のカイザー効果についても報告されている。しかしながら土を対象とした事例はまだあまり見受けられない。

今回の実験において、一定垂直応力下で砂に一定せん断応力片振幅を繰り返し与えると図-8-3 に示したように各 1 回の繰り返しサイクルで生じる残留変位 $\Delta\delta_i$ はサイクル数が増すにつれて減少し、ついに消散して砂は弾性状態となる。一方、せん断開始後各サイクル中に発生した AE の総計数 N は残留変位に応じて

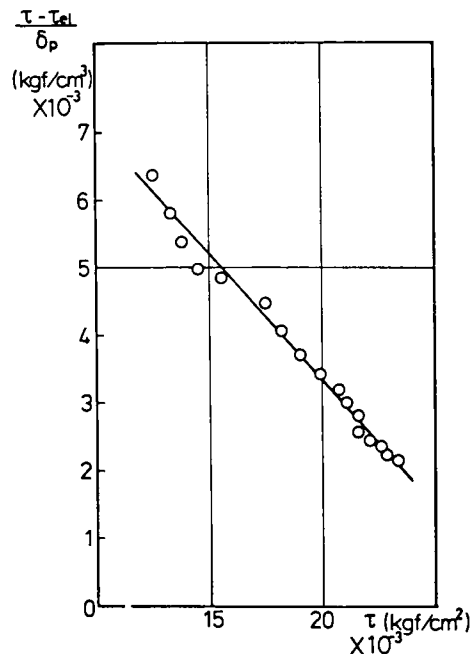


図-8-7 $(\tau - \tau_{el}) \sim \tau$ 関係

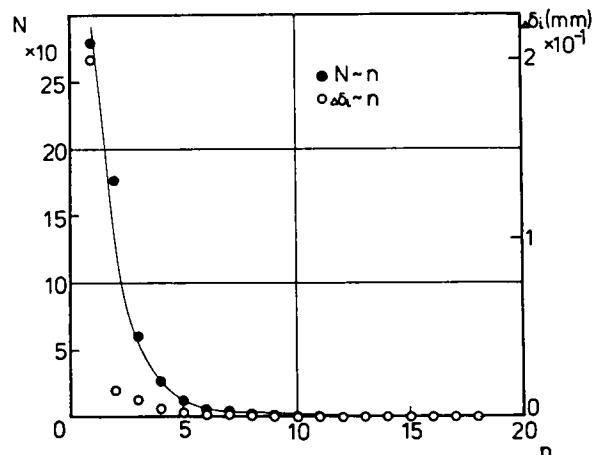


図-8-8 粒状土におけるカイザー効果

減少し、AEが検知されるのはせいぜい4～5サイクルで、その後はほとんど認められない。すなわち砂の場合のカイザー効果は、金属材料のように明確に現れるのではなく図-8-8に示すように残留変位 $\Delta\delta_i$ の減少に伴って明確に現われることがわかる。このようにAEの発生が感知できる期間は砂に弾塑性状態が残っている間であることから、AE発生数は弾塑性時や破壊時に生じる砂粒子の転移数に依存しているものと考えられる。

d) 応力-変位曲線とAEの相関性

繰り返しせん断によって弾性状態にした試料に対して、せん断応力 τ を載荷する過程での応力-変位、AEの累計数-変位関係を図-8-9に示す。図の応力-変位曲線より、弾性限界せん断応力 τ_{el} および破壊点を求め弾性-、弾塑性-および破壊-領域を区別し、各領域に対してAE累計数-変位関係を比べてみると、砂の弾性状態は、第3節で定義したように、繰り返しを行うことにより、除荷時において残留変位の増加が認められなくなり、それに伴ってAEの発生数が極端に減少し、前述

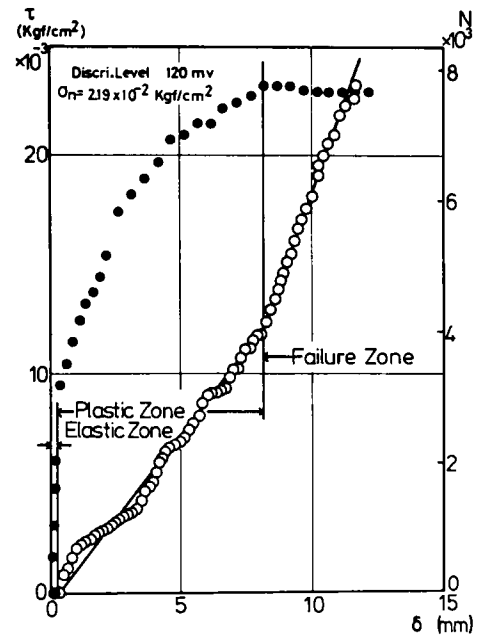


図-8-9 応力～変位～AE累積数関係

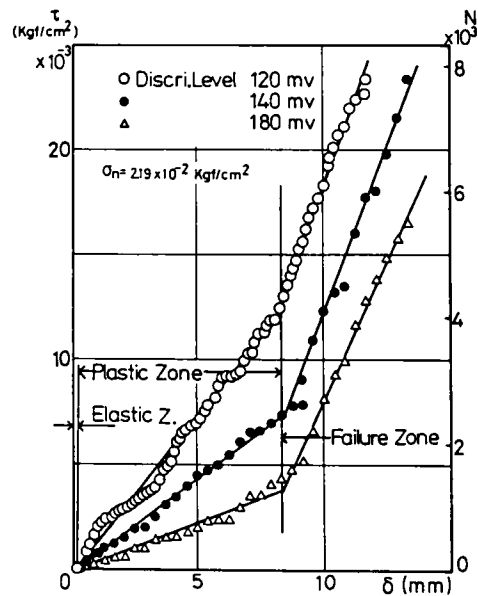


図-8-10 種々なディスクリレベルによる $\tau \sim \delta \sim N$ 関係

したように砂におけるカイザー効果が現われる。弾性状態以降のAE累積数と水平せん断変位の関係はいずれのデータも折線をもつ直線で示され、塑性状態では、砂粒子はせん断応力を除荷しても弾性状態のように当初の位置へ戻らないため、弾性状態の時のようにAE発生数は減少せず変位量にほぼ比例したAEの発生が見られる。また、破壊状態においても同様なことがいえ、いずれの領域においても $N \sim \delta$ 関係は直線で示される。これらのことより $N \sim \delta$ 関係において折線を境にして勾配が変わっているのは、砂が、各状態で異なった挙動を示している。このように砂粒子の微視的挙動により発生すると推定されるAEの

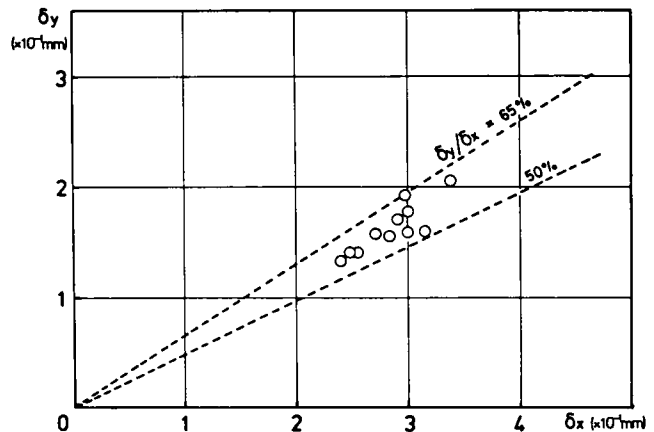


図-8-11 δ_x と δ_y の関係

特性が弾性、塑性および破壊の三状態に対応して変化することから、AEの特性からも砂のせん断過程における各状態の存在が確認されたといえる。また、AE累計数-水平変位関係において、ディスクリレベルをパラメータにとったものを図-8-10に示す。いずれの折線においても直線の勾配の違いこそあれ折点に対する変位は各領域の境界の変位を示している。なお、直線の勾配の違いは数居値の設定と対応している。

以上のことから次のようにいえる。弾性限界以上のせん断応力を加えたとき感知されるAE数は、せん断中に生じた変位に比例するといえる。

e) 载荷方向の異方性がカイザー効果に及ぼす影響

(1) X, Y 各方向で繰り返しせん断をした砂の応力-変位特性

実験-a : 前節では一方向(X方向)のみの繰り返しせん断による砂の弾性化について論じたが、ここでは砂をX方向に繰り返しせん断を行って弾性状態にしたのちその一定垂直応力をそのままに保ち、せん断箱を 90° 回転してY方向で砂に繰り返しせん断を与えてY方向にも弾性状態にした。X, Y各方向において砂が弾性状態に至るまでに生じた総残留変位をそれぞれ δ_x , δ_y とする。同じ砂で作った新鮮試料それぞれに対してこ

の一連の試験を行い各試料で得られた δ_x, δ_y をそれぞれ横軸、縦軸に表すと図-8-11 となる。図よりみればいずれの試料においても弾性化に達するまでに生じた Y 方向の総残留変位 δ_y は X 方向の総残留変位の 50 ~ 65 % の範囲になっている。したがって、砂を X 方向において弾性化したことが Y 方向に弾性化することに及ぼした影響量は 35 ~ 50 % の範囲であったことがわかる。

実験-b : 次に、X 方向で弾性状態にした砂のせん断方向を水平に 90° 回転して、Y 方向で繰返しせん断をおこなって、Y 方向に対して弾性状態にしたのち、元の X 方向に回転すると、一度は X 方向で弾性状態になった試料が Y 方向の繰返しせん断により、砂粒子配列が変化を受け、最初得ていた X 方向の弾性状態は崩されていることがわかった。そこで、再び X 方向での繰返しせん断を行うと、この場合は数回の繰返しせん断により再び X 方向は弾性状態に至る。しかし、この砂を再び Y 方向に回転すると、Y 方向の弾性状態はやはり多少崩されている。そのため X 方向と Y 方向の繰返しせん断による弾性化操作を交互に何回か（この試験では 42 回）繰返せば、ついに X 方向にも、Y 方向にもともに完全な弾性状態となるに至る。なお、ここに述べた完全弾性状態とは X, Y 両方向とも弾性である砂の状態をいうことにする。これらの X, Y 各方向の交互の弾性化に至る過程の応力-変位関係の一例を図-8-12 に示す。図よりみれば、X, Y 両方向のいずれにおいても、それぞれの方向での弾性化までの繰返しせん断の回数は X, Y 各方向での弾性化操作の繰返し回数の増加とともに減少する。また、X, Y それぞれの方向での弾性化までの総残留変位の量も同様に、X, Y 各方向での弾性化操作の繰返しの回数の増加とともに減少している。

上述の砂の弾性化に伴う残留ひずみの増進の減少は、弾塑性状態の砂がせん断の付与によりひずみ硬化を生ずる現象と粒子構造を同じくしている¹⁰⁾。ゆえに以上の実験からみれば、砂では一方向のせん断の付与によって、その付与の方向にひずみ硬化を生じさせるとともに、付与の方向と直交する方向にも 35 ~ 50 % の寄与をしていることが認められる。このことによって、一方向のせん断の付与によって生じるひずみ硬化の異方性の程度をはかることができる。

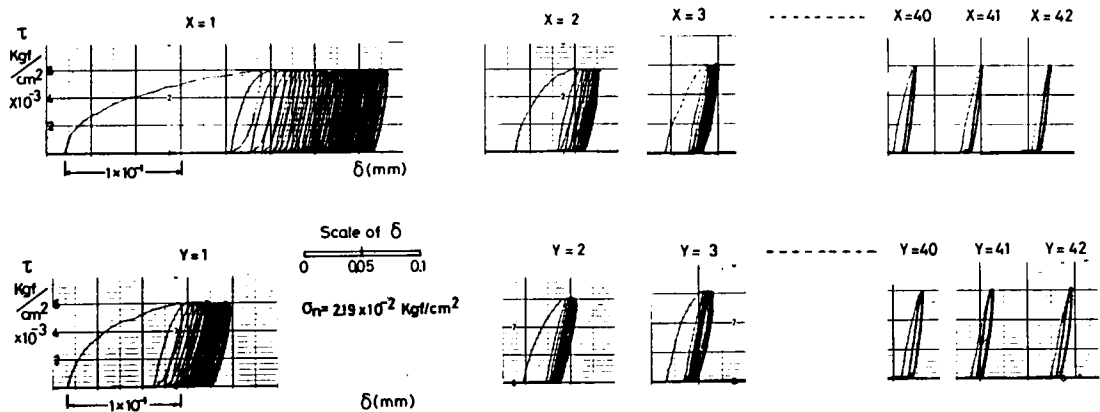


図-8-12 X, Y 両方向の繰返しせん断

(2) X, Y 各方向で繰返しせん断をした砂のAE特性

実験 - a で X, Y 各方向における第 1 回目のせん断終了時までに発生したそれぞれの方向でのAE累積数を示すと図-8-13 になる。図より Y 方向で発生したAE累積数 N_y は、X 方向の累積数 N_x のほぼ 40 ~ 50 % の範囲である。この値を実験 - a の X, Y 各方向の弾性化までの総残留変位の関係を示した図-8-11 と比較すれば、若干の差はあるが、ほぼ似た値になっている。このことは、当初弾塑性状態にある砂試料がある大きさのせん断応力を受けたときに発生するAE累積数は、その粒子配列の砂が、そのせん断応力を繰返して弾性状態に移行するまでに発生する総残留変位と比例しているといえる。そのため、このAE関係によって X, Y 各方向に対して砂の弾塑性状態の中に含まれる塑性成分の程度、および、それが X, Y 各方向に対してどの割合になっているかを知ることができる。

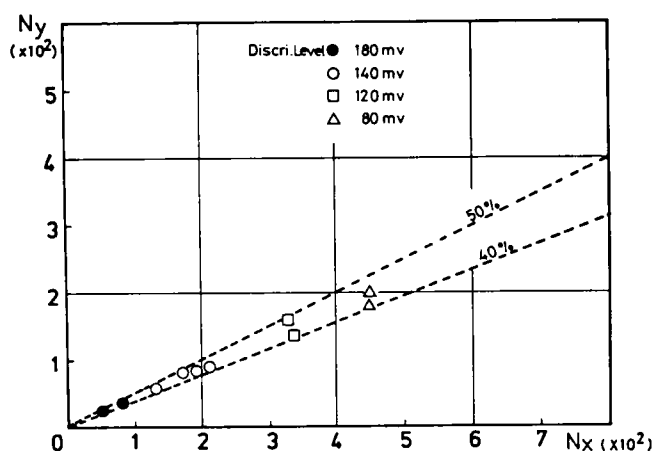


図-8-13 N_x と N_y の関係

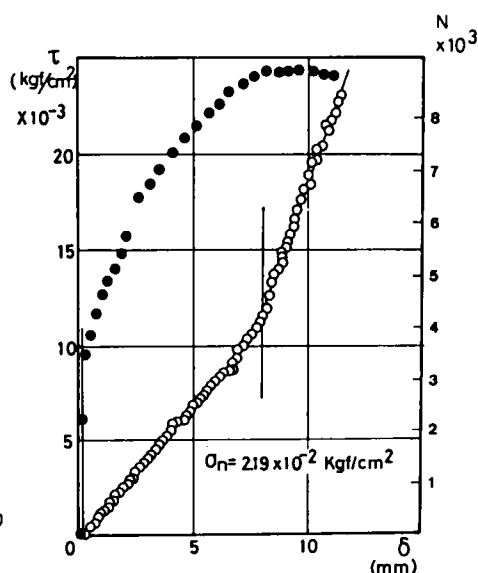


図-8-14 応力～変位～AE累積数関係

次に、X、Y 各方向の繰返しせん断を交互に行って完全弾性状態にした試料を X 方向において破壊までせん断させたときのAE累積数とせん断変位、ならびにせん断応力とせん断変位の関係を示したのが図-8-14 である。一方、さきの図-8-9 は X 方向のみの繰返しで弾性状態になった砂をせん断したときの変位とAE発生数の関係であるが、この図-8-9 を完全弾性砂に対する同様な図-8-14 と比較すると、図-8-14 の方が各状態領域とも変位とAE発生数との比例関係は、ばらつきがよりすくない関係になっていることが認められる。これは完全弾性砂の粒子配列が X 方向のみに弾性化した砂の粒子配列に比べて一層整然としているからであるといえる。

第5節 結論

本章は、微視的な立場から導かれた砂の構成式の誘導過程の検証と砂の変形に伴う粒子状態の異方性を知るため、一面せん断試験機を用いて、砂の変形特性とAE現象を粒子構造の面から解明したものである。得られた主な成果は次の通りである。

- 1) 繰返しせん断の回数の増加とともに、残留変位の増加率は減少するが、同時にAE発生割合も減少してゆき、砂が弾性状態に達すると、AEの発生はなくなる。このことは、

砂におけるカイザー効果であって、砂の場合は金属材料などの場合のように先行応力の点で明瞭に現れるのではない。すなわち砂の場合では、AEの発生は弾塑性状態の中に含まれる塑性の成分に比例し、弾性化して塑性成分が減少するに伴い徐々に減少する。

2) AEの発生特性は、砂の弾性状態、弾塑性状態および破壊状態によって異なり、弾塑性および破壊の各状態では、それぞれの状態ごとに、変位にほぼ比例して発生している。このことは、単位ひずみ中に発生するAE累積数が単位ひずみを生じるために転移する粒子数に比例するとみられることから、粒子 1 個の平均転移距離は弾塑性および破壊の各状態ごとで一定であると推定される。

3) X 方向の繰返しせん断を行って弾性状態を作り出すときの総残留変位 δ_x を求めたのち、垂直応力を変化させずにせん断箱を水平に 90° 回転させた Y 方向について同様に弾性状態にするまでの総残留変位 δ_y を求めると、 δ_y / δ_x の比は 35 ~ 50 % であることがわかった。

4) 砂の弾性化過程は弾塑性状態の砂がせん断の付与によりひずみ硬化を生じる現象と粒子機構を同じくしているとみられる。ゆえに上記(3)の結果、砂では一方向のせん断の付与により、ひずみ硬化に異方性が存在することになるが、その効果は付与の方向と直交する方向に 35 ~ 50 %の寄与をしていることが知られた。

5) 上記(3)の実験の際のAE発生をみれば、繰返し第一回目に X 方向を弾性状態にするまでのAE累積数 N_x と、同様の第一回目の Y 方向のAE累積数 N_y の比 N_y / N_x は、いずれの試料でも 40 ~ 50 %の範囲内であり、この値は上記の 30 ~ 40 %とほぼ一致しており、このことによっても X, Y 両方向の粒子状態の異方性を推定することができる。

参考文献

- 1) 村山朔郎：弾性状態にある砂の構成式、土木学会論文報告集、第236号、pp.125-137,1975.
- 2) 村山朔郎：塑性状態にある砂の構成式、土木学会論文報告集、第251号、pp.77-89,1976.
- 3) Murayama,S. : Constitutive Equation of Particulate Material in the Failure State ,Proc.Spec.Session 9 ,9th.,I.C.S.M.F.E.,pp.183-190,1977.
- 4) 金川 忠 他：岩石における地圧成分の Acoustic Emission による推定の試み、土木学会論文報告集、第258号、pp.63-75,1977.
- 5) 村山朔郎 他：Acoustic Emission による初期地圧推定方法、岩盤力学シンポジウム講演論文集、pp.160-164,1984.
- 6) Tanimoto,K. and Noda,T. : A Study of Acoustic Emission from Sandy Soils, Proc.9th,I.C.S.M.F.E.,pp.315-318,1977.
- 7) 谷本喜一 他：土のダイレイタンスー特性とAE特性の相関について、土木学会関西支部年次学術講演概要集、pp.6-1 ~ 6-2,1984.
- 8) 丹羽義次 他：Acoustic Emission の発生機構に関する考察、土木学会論文報告集第314号、pp.125-136.1981.
- 9) Murayama,S. : Constitutive Equations of Particulate Material in the Plastic State,Proc.Spec.Session 9 ,9th I.C.S.M.F.E.,pp.175-182,1977.

第9章 結 論

本論文では、AEのカイザー効果現象を利用して、地山における岩盤の有する地圧や粘性土の先行圧縮応力および粒状土のせん断中における粒子挙動を知る目的で、主に地盤材料に関するカイザー効果特性について述べた。以下本論文で述べた研究内容および得られた主な結果をまとめて、本論文の結論とする。

第1章では、本研究の目的、既往の研究および本研究の内容と構成について述べた。

第2章では、実験に用いたそれぞれの試料（岩石、粘性土および粒状土）に対するAE測定装置および測定条件について述べた。

第3章では、花崗岩供試体に対して、種々な載荷方法で予め与えた軸応力がカイザー効果より求められる軸応力とどのような関係にあるのかを明らかにした。ここで得られた結果を要約すると次のようである。

(1) 大きさの異なる軸応力を各面に繰り返し載荷によって与えた立方供試体においては、各軸応力方向において残留ひずみが一定になるまで載荷が行われた供試体（ひずみ飽和状態）のみ、カイザー効果から載荷方向ごとの先行軸応力を高い精度で見出すことができる。これに対し、残留ひずみの増加がなお認められる状態で載荷を中止した、いわゆるひずみ不飽和状態の供試体においては、AEより求められる先行軸応力は当初与えた軸応力よりも小さな値となる。このことより、花崗岩におけるAEのカイザー効果は、ひずみ飽和の程度に影響していると考えてよい。

(2) 上記(1)と同じ載荷方法で、残留ひずみが一定になるまで軸応力を繰り返し与えた立方供試体の中央部から一表面に垂直に円柱供試体を切り出し、この供試体のカイザー効果から先行軸応力を推定した結果、その面に与えた軸応力の1%の誤差内にあった。したがって、載荷方向の岩石試料がひずみ飽和状態であれば、AEのカイザー効果を利用することによって、その載荷方向に与えた軸応力を他の方向の載荷と無関係に精度よく推定することが可能であるといえる。

(3) 円柱供試体に繰り返し三軸圧縮を行い、鉛直軸方向において、ほぼひずみ飽和状態の試料であれば、カイザー効果より当初鉛直軸方向に与えた応力にほぼ等しい値が得られ、側圧の大小にはほとんど影響を受けないことが明かとなった。しかしながら、ひずみ不飽和状態の場合では、当初与えた鉛直軸圧よりもかなり小さな値となることがわかつ

た。

第4章では、クリープによる残留ひずみとカイザー効果の関係を調べるために、供試体に一軸圧縮応力を与えて、クリープさせたのち、AE試験を行った。その結果をまとめると次のようである。

(1) 岩石供試体が一定応力（一軸圧縮状態、以下同様）を長期間受け、クリープひずみが増加しない状態になった場合（ひずみ飽和状態）には、予め与えた軸応力はカイザー効果により数パーセント以内の誤差で推定される。ここでの試験結果では除荷時の残留ひずみは載荷以後にクリープによって生じたひずみに等しかった。

(2) 岩石供試体に一定応力をひずみ飽和状態になるまで（今回の実験では7～10日間）与えた後、除荷し放置すれば、放置期間が長ければ長いほど軸ひずみの回復量は大きくなり、それに伴ってカイザー効果より求められる見掛けの先行軸応力は小さく測定されるが、残留ひずみの回復率が約20%以内（今回用いた試料では放置期間が4日以内）まででは、カイザー効果により求められる見掛けの先行軸応力は与えた軸応力にほぼ等しかった。しかしながら、残留ひずみの回復率が84%の場合では、カイザー効果より求められる見掛けの先行軸応力は、予め与えた軸応力の約半分の値となった。

(3) 岩石供試体にクリープひずみの増加が停止するまで一定応力を与え、いわゆるひずみ飽和状態とした後、荷重を段階的に減じ、減じた軸応力の下でクリープひずみが一定となるまで（今回の試験では7日間）放置した場合、カイザー効果より求められる見掛けの先行軸応力は、予め与えた先の軸応力値ではなく、減じた最終の軸応力値にほぼ等しくなる。いいかえれば、カイザー効果によって推定される見掛けの先行軸応力は必ずしも過去に受けた最大の軸応力ではなく、AE試験の時点において、その試料に残留ひずみを生じさせた軸応力が測定されることとなる。

第5章では、第3章および第4章における花崗岩のカイザー効果特性が他の岩種においてもいえるのかどうかを調べた結果、大理石を除く岩種（凝灰岩、泥岩、砂岩および結晶片岩）では花崗岩における結果とほぼ同一であった。得られた結果を要約すると次のようである。

(1) 一定振幅の軸応力で載荷－除荷を繰り返し行えば、最終的には残留ひずみの増加が停止する状態（ひずみ飽和状態）になる。この状態における大理石を除く各種供試体では、AEのカイザー効果より得られる見掛けの先行軸応力は、予め与えた軸応力にほぼ等しくなった。しかしながら、軸ひずみの増加が認められる状態（ひずみ不飽和状態）で繰り

返し載荷を中止した試料では、カイザー効果より得られる見掛けの軸応力は予め与えた軸応力よりもかなり小さな値となった。

(2) 一定の軸応力下でクリープによるひずみの増加が停止した各種供試体（ただし大理石を除く）において、カイザー効果より得られる見掛けの先行軸応力は、先に与えた軸応力にほぼ等しくなった。しかしクリープによるひずみの増加が認められる状態で載荷を中止した場合においては、先に与えた軸応力よりもかなり小さな値となった。

(3) したがって、結論(1),(2)より大理石を除く他の岩石におけるカイザー効果は、花崗岩と同様に、供試体に与えた応力よりもむしろ供試体に残留しているひずみに依存しているといえる。

第6章では、原位置から採取した岩石供試体を用い、試料採取後、応力解放に伴って回復するひずみがカイザー効果現象にどのような影響をもたらすのか、また、一般的に地圧を求める際よく利用されている応力解放法とAE測定により求められる見掛けの応力との間にどのような関係があるのかを明らかにした。結果を要約すると次のようである。

地山から採取した岩石試料を恒温、恒湿な場所で種々の期間放置した後、一軸圧縮試験によりAEを測定し、見掛けの先行軸応力を求めた結果、岩石採取後5日目位を境にして、見掛けの先行軸応力は急激に小さくなる傾向がうかがわれる。また岩石採取後10日目以降（今回の実験では20数日まで）では、カイザー効果より推定される応力はほぼ一定値に落ち着く傾向が認められた。このことは、第4章の第3節における、一定クリープ荷重除荷後4日目以内であれば、予め与えた応力に等しい応力が見出せるが、それ以降は徐々に小さくなることと良い対応を示している。いずれにしても、カイザー効果を利用して、岩石の地圧を求める場合、岩石採取後はできるだけ早い時期に試験を行う必要があることがわかる。

第7章では、市販粉末粘土および乱さない洪積粘土を用いて、排水等方三軸圧縮試験中に発生するAEを観測することにより、粘性土におけるカイザー効果の確認ならびに洪積粘土の p_c を推定し、圧縮試験により求めた先行圧縮応力 $p_{c \cdot con}$ との比較を行い、その有効性を明らかにした。得られた結果の概要は次のようである。

(1) 金属や岩石にみられるカイザー効果は粘性土においても同様に認められ、AE測定から得た p_c 値は、過去に受けた最大応力にほぼ等しい。

(2) 排水等方三軸圧縮中に発生するAEを観測することにより、洪積粘土の先行圧縮応力は圧密試験による $p_{c \cdot con}$ とほぼ同程度の精度で求められる。

第8章では、砂をせん断する時に発生するAEを観測し、砂の応力-ひずみ関係と対比させたもので、粒状体の粒子挙動とAEの関係を明らかにした。その結果をまとめると次のようになる。

(1) 繰り返しせん断の回数の増加とともに、残留変位の増加率は減少するが、同時にAE発生割合も減少してゆき、砂が弾性状態に達すると、AEの発生はなくなる。このことは、砂におけるカイザー効果であって、砂の場合は金属材料などの場合のように先行応力の点において明瞭に現れるのではない。すなわち、砂の場合では、AEの発生は、弾塑性状態の中に含まれる塑性の成分に比例し、弾性化して塑性成分が減少するのに伴い徐々に減少する。

(2) AEの発生特性は、砂の弾性状態、弾塑性状態および破壊状態によって異なり、弾塑性および破壊の各状態では、それぞれの状態ごとに、砂の水平変位にほぼ比例して発生する。

(3) X方向の繰り返しせん断を行って弾性状態を作り出すときの総残留変位 δ_x を求めたのち、垂直応力を変化させずにせん断箱を水平に 90° 回転させた Y 方向について同様に弾性状態にするまでの総残留変位 δ_y を求めると、 δ_y / δ_x の比は 35 ~ 50 % であることがわかった。

(4) 砂の弾性化過程は弾塑性状態の砂がせん断の付与によりひずみ硬化を生じる現象と粒子機構を同じくしているとみられる。ゆえに上記(3)の結果、砂では、一方向のせん断の付与により、ひずみ硬化に異方性が存在することになるが、その効果は付与の方向と直交する方向に 35 ~ 50 % の寄与をしていることが知られた。

(5) 上記(3)の実験の際のAE発生をみれば、繰り返し第 1 回目に X 方向を弾性状態にするまでのAE累積数 N_x と、同様の第 1 回目の Y 方向のAE累積数 N_y の比 N_y / N_x は、いずれの試料でも 40 ~ 50 % の範囲内であり、この値は上記の 35 ~ 50 % とほぼ一致しており、このことによっても X、Y 両方向の粒子状態の異方性を推定することができる。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、御多忙中にもかかわらず暖かい御助言と御鞭撻かつ終始懇切な御指導を賜った京都大学教授柴田 徹先生に厚く御礼申し上げる次第である。本論文の内容について終始一貫して暖かくかつ適切な御指導と不断の御激励を賜った京都大学名誉教授村山朔郎先生に深く感謝いたします。

また、本研究におけるAEの装置等に関して有益な御助言を賜った京都大学教授小林昭一先生および有益な御助言を賜った京都大学助教授関口秀雄先生に対して心からなる謝意を表します。

さらに、本研究を遂行するにあたって種々の御支援を頂いた（株）大林組技術研究所次長齋藤二郎氏、同室長藤原紀夫氏、同研究員吉岡尚也氏、畑 浩二氏はじめ、（株）川崎地質の坂上敏彦君に対しても心より感謝いたします。

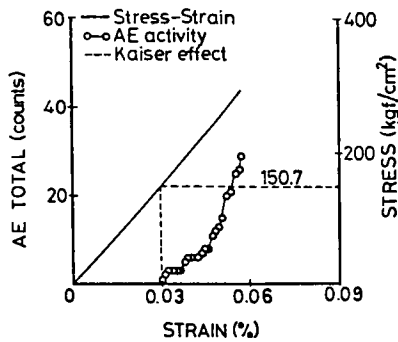
付 録

(資料)

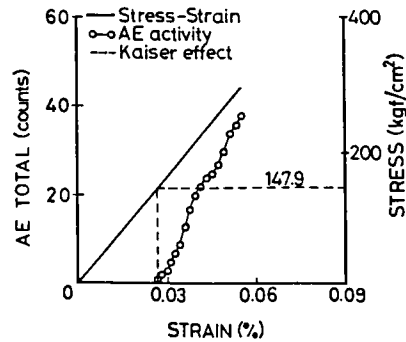
1. 載荷方法が種々の岩石のカイザー効果に及ぼす影響
2. 種々な岩石のクリープひずみとカイザー効果の関係
3. 応力の解放時間とカイザー効果の関係

1. 載荷方法が種々の岩石の カイザー効果に及ぼす影響

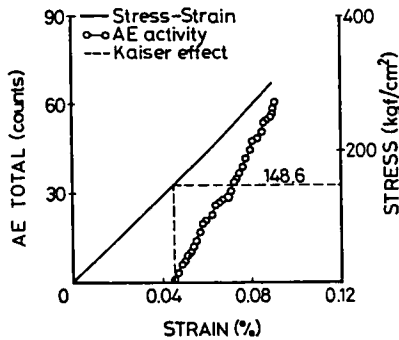
A. ひずみ飽和状態における各種岩石のカイザー効果より推定される先行軸応力
(各試料とも繰り返し回数 50 回で、繰り返し応力は花崗岩、凝灰岩においては、それぞれ 150kgf/cm² で、結晶片岩および砂岩は 100kgf/cm² である。)



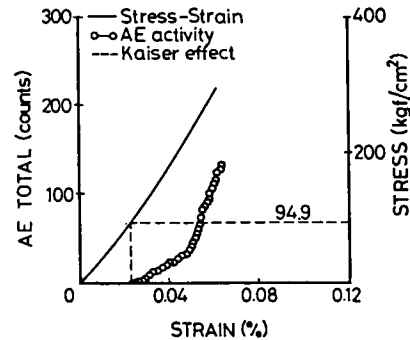
(a) 花崗岩



(b) 凝灰岩

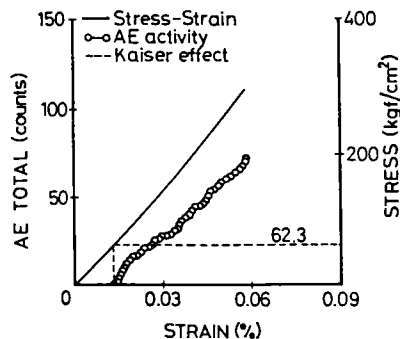


(c) 砂岩

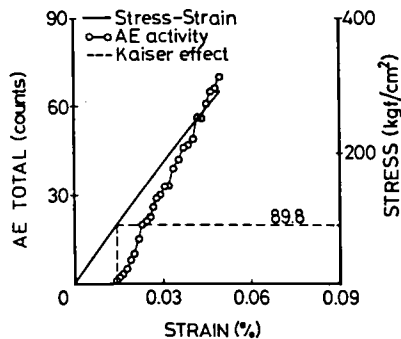


(d) 結晶片岩

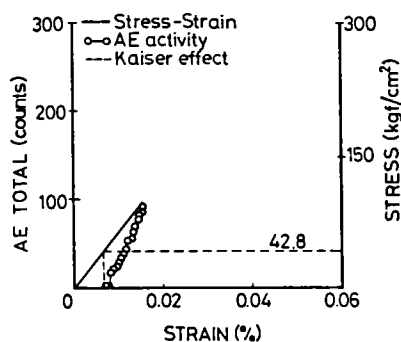
B. ひずみ不飽和状態における各種岩石のカイザー効果より推定される先行軸応力
(各試料とも繰り返し回数 50 回で、繰り返し応力は花崗岩、凝灰岩においては、それぞれ 150kgf/cm² で、結晶片岩および砂岩は 100kgf/cm² である。)



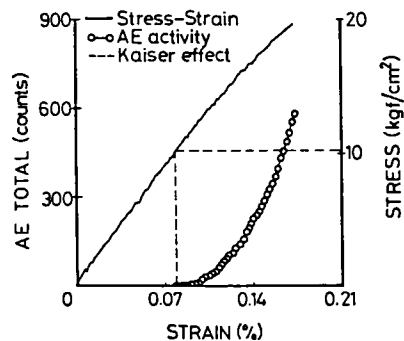
(a)花崗岩



(b)凝灰岩



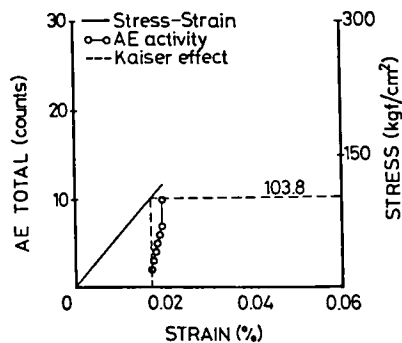
(c)砂岩



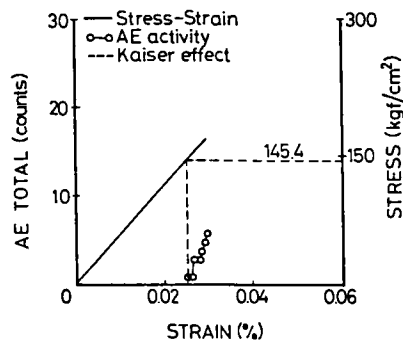
(d)結晶片岩

C. 岩石の異方性とカイザー効果より得られる先行軸応力の関係（花崗岩）

（二方向の繰り返し荷重を受けた試料の X,Y 各方向の先行軸応力の推定）



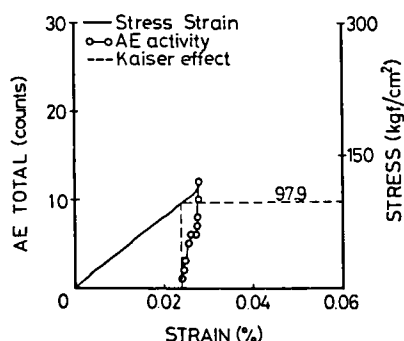
(a) $(X : 100\text{kgf/cm}^2)_{50} \rightarrow (Y : 150)_{50}$
 $\rightarrow (X : 118\text{kgf/cm}^2)_1$



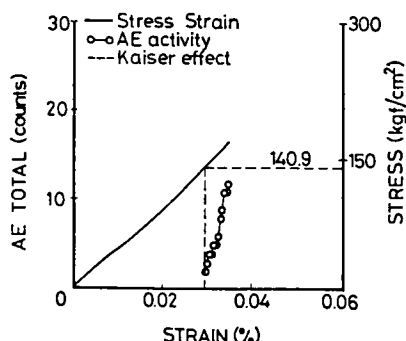
(b) $(X : 100\text{kgf/cm}^2)_{50} \rightarrow (Y : 150)_{50}$
 $\rightarrow (Y : 170\text{kgf/cm}^2)_1$

D. 岩石の異方性とカイザー効果より得られる先行軸応力の関係（凝灰岩）

（二方向の繰り返し荷重を受けた試料の X, Y 各方向の先行軸応力の推定）



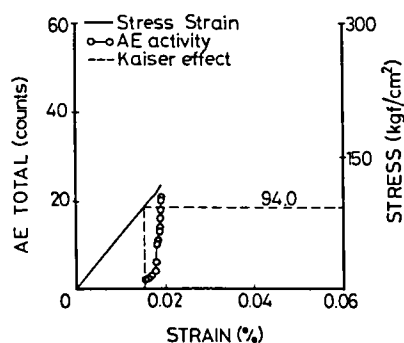
(a) (X : 100kgf/cm²)₅₀ → (Y : 150)₅₀
→ (X : 118kgf/cm²)₁



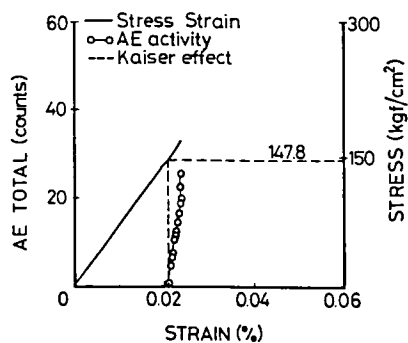
(b) (X : 100kgf/cm²)₅₀ → (Y : 150)₅₀
→ (Y : 170kgf/cm²)₁

E. 岩石の異方性とカイザー効果より得られる先行軸応力の関係（砂岩）

（二方向の繰り返し荷重を受けた試料の X, Y 各方向の先行軸応力の推定）



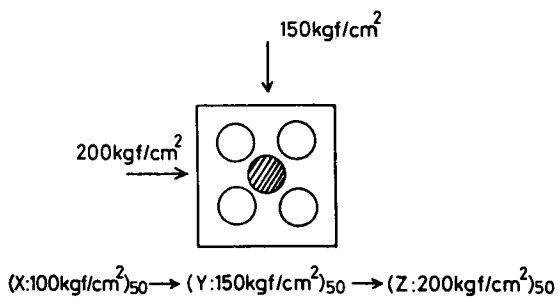
(a) (X : 100kgf/cm²)₅₀ → (Y : 150)₅₀
→ (X : 118kgf/cm²)₁



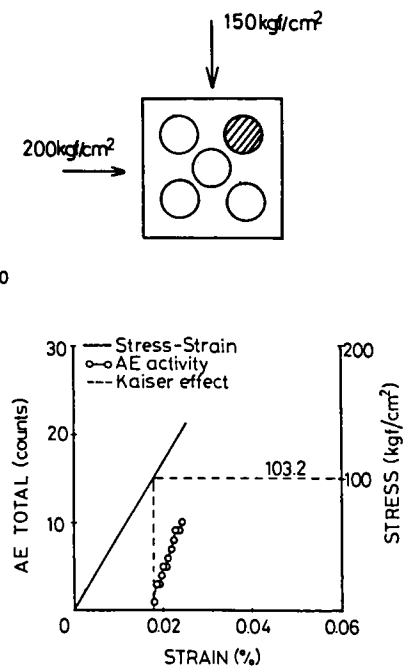
(b) (X : 100kgf/cm²)₅₀ → (Y : 150)₅₀
→ (Y : 170kgf/cm²)₅₀

F. 三方向(X,Y,Z)ともひずみ飽和状態の供試体から X 方向を軸とする円柱供試体を切出した場合の先行軸応力とカイザー効果より推定される応力との関係（花崗岩）

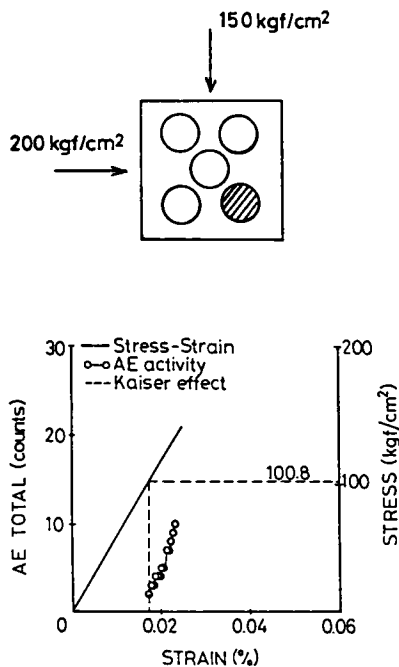
（各方向とも繰り返し回数は、50 回）



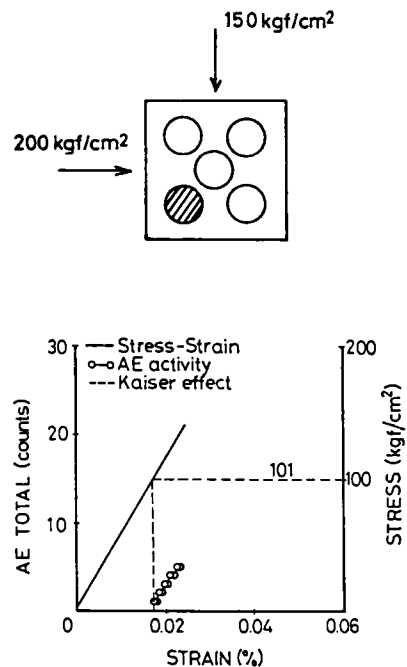
(a)中央部より切出した場合



(b)右上より切出した場合

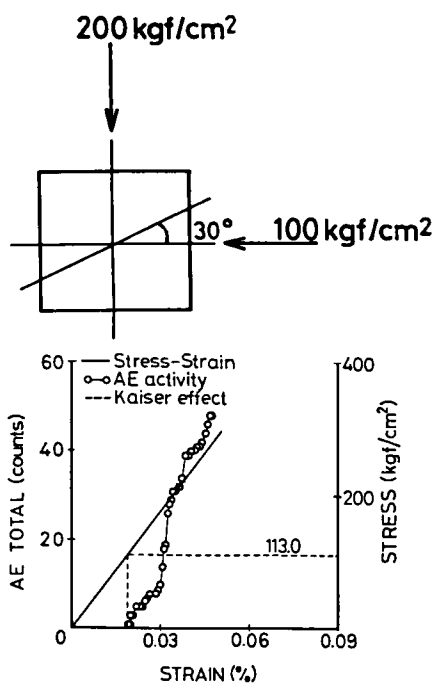


(c)右下より切出した場合

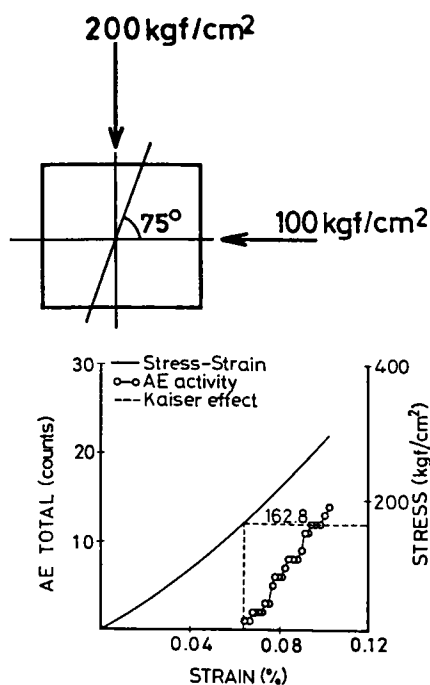


(d)左下より切出した場合

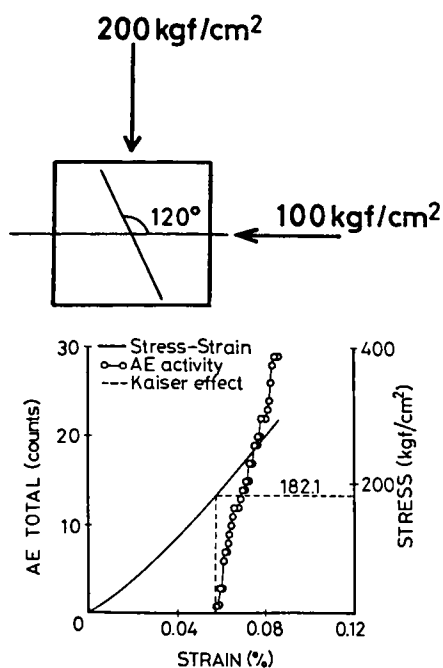
G. 三方向ともひずみ飽和状態の立方供試体から、ある傾き（X軸を基準にして）もつ方向から円柱供試体を切出した場合の先行軸応力とカイザー効果より推定される先行応力の関係【载荷応力は（X：100kgf/cm²）₅₀→（Y：150）₅₀→（Z：200）₅₀→（X：118）₁】



(a)



(b)



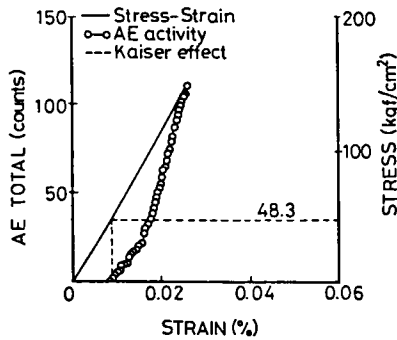
(c)

(a) : X 軸方向を基準にして30° 方向から切出した場合

(b) : X 軸方向を基準にして75° 方向から切出した場合

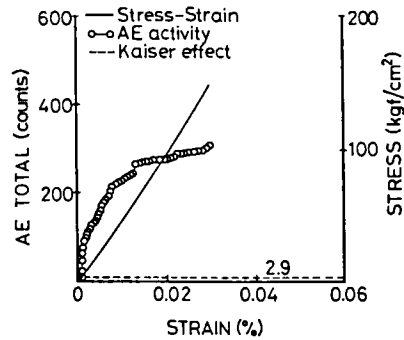
(c) : X 軸方向を基準にして120° 方向から切出した場合

H. 三軸圧縮試験機により、三軸応力を受けたひずみ飽和状態の試料とひずみ不飽和状態の試料における先行軸応力と推定先行応力との関係



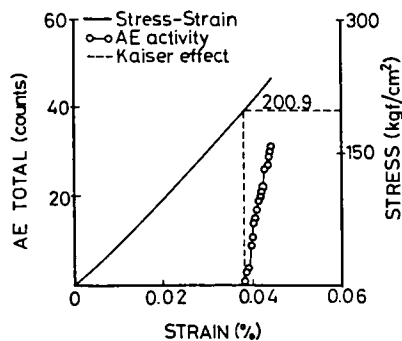
(a) ($\sigma_1=50\text{kgf/cm}^2$, $\sigma_3=50\text{kgf/cm}^2$)₅₀

(繰返し50回、ひずみ飽和状態)



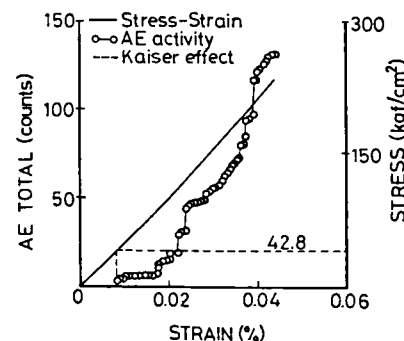
(b) ($\sigma_1=50\text{kgf/cm}^2$, $\sigma_3=50\text{kgf/cm}^2$)₁₀

(繰返し10回、ひずみ不飽和状態)



(a) ($\sigma_1=200\text{kgf/cm}^2$, $\sigma_3=50\text{kgf/cm}^2$)₅₀

(繰返し50回、ひずみ飽和状態)



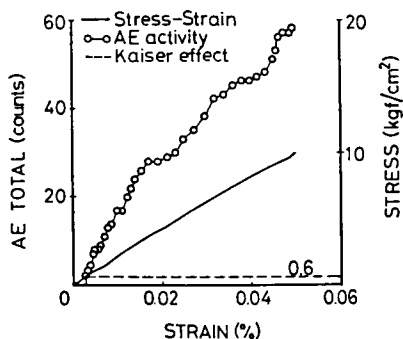
(b) ($\sigma_1=200\text{kgf/cm}^2$, $\sigma_3=50\text{kgf/cm}^2$)₁₀

(繰返し10回、ひずみ不飽和状態)

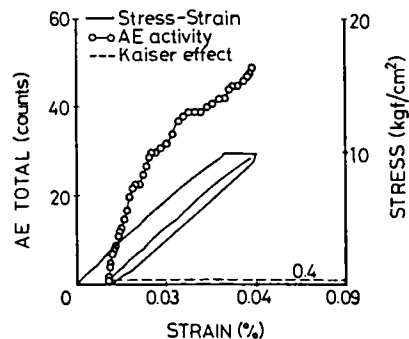
2. 種々な岩石のクリープ

ひずみとカイザー効果の関係

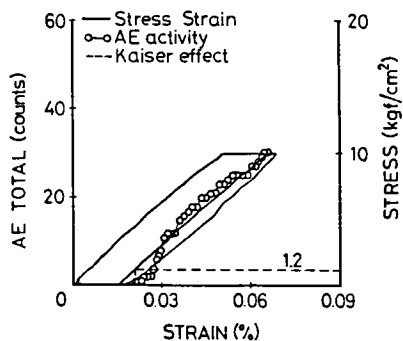
A. クリープ時間の差異による先行軸応力とカイザー効果より得られる先行応力の関係



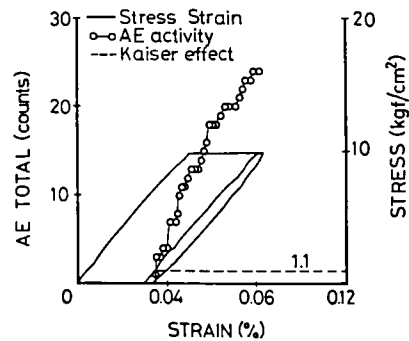
(a) クリープ時間 = 0 h



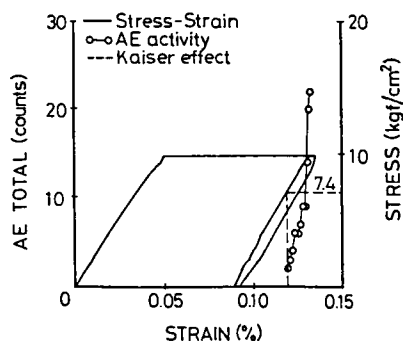
(b) クリープ時間 = 0.5 h



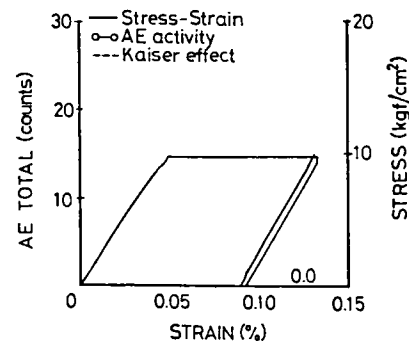
(c) クリープ時間 = 2 h



(d) クリープ時間 = 12 h

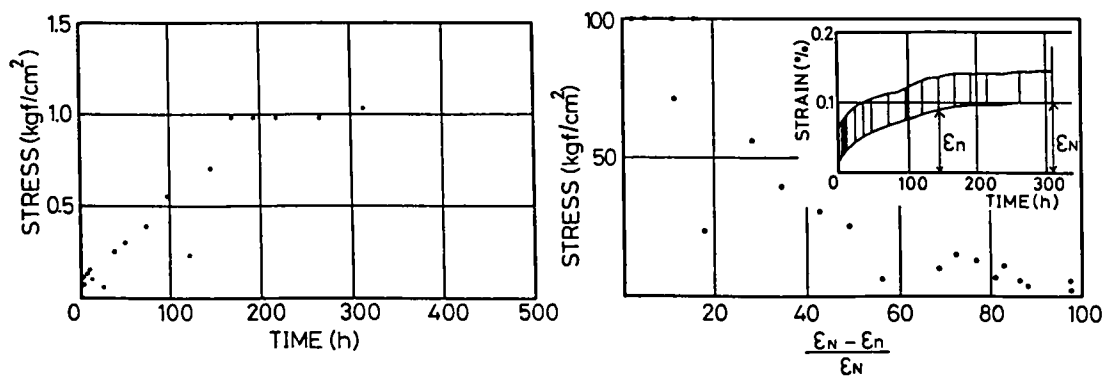


(e) クリープ時間 = 144 h



(f) クリープ時間 = 168 h

B. A. におけるクリープ時間とカイザー効果より推定される先行軸応力の関係および
 カイザー効果より推定される先行軸応力とクリープひずみの関係

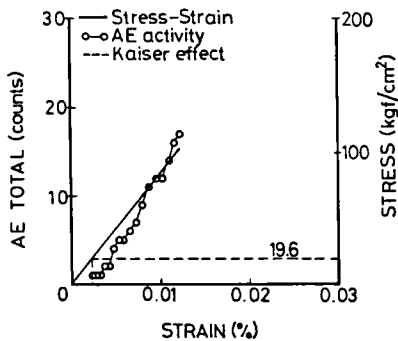


(a) クリープ時間と先行軸応力の関係

(b) 推定応力とクリープひずみの関係

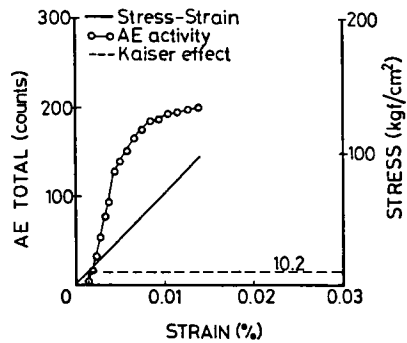
3. 応力の解放時間とカイザー効果の関係

A. 地山より採取後の応力解放時間とカイザー効果より推定される先行応力の関係



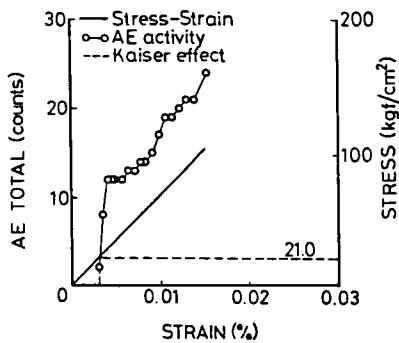
(a) II 方向から採取した試料

経過日数 1 日



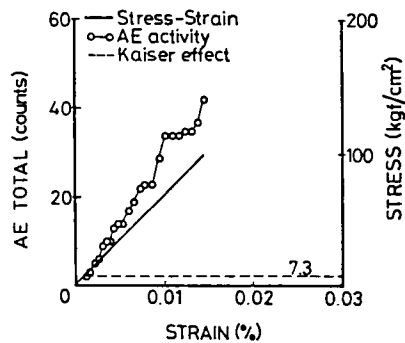
(b) II 方向から採取した試料

経過日数 10 日



(a) III 方向から採取した試料

経過日数 1 日



(b) III 方向から採取した試料

経過日数 10 日